

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2003-85526

(P2003-85526A)

(43) 公開日 平成15年3月20日 (2003.3.20)

| (51) Int.Cl. <sup>7</sup> | 識別記号  | F I           | テームト* (参考) |
|---------------------------|-------|---------------|------------|
| G 0 6 N 3/00              | 5 5 0 | G 0 6 N 3/00  | 5 5 0 C    |
| G 0 6 F 9/44              | 5 5 0 | G 0 6 F 9/44  | 5 5 0 C    |
| H 0 1 L 21/02             |       | H 0 1 L 21/02 | Z          |

審査請求 未請求 請求項の数13 O L (全 27 頁)

(21) 出願番号 特願2001-276325(P2001-276325)

(22) 出願日 平成13年9月12日 (2001.9.12)

(71) 出願人 000003078

株式会社東芝

東京都港区芝浦一丁目1番1号

(72) 発明者 和田 哲典

神奈川県横浜市磯子区新杉田町8番地 株

式会社東芝横浜事業所内

(74) 代理人 100083806

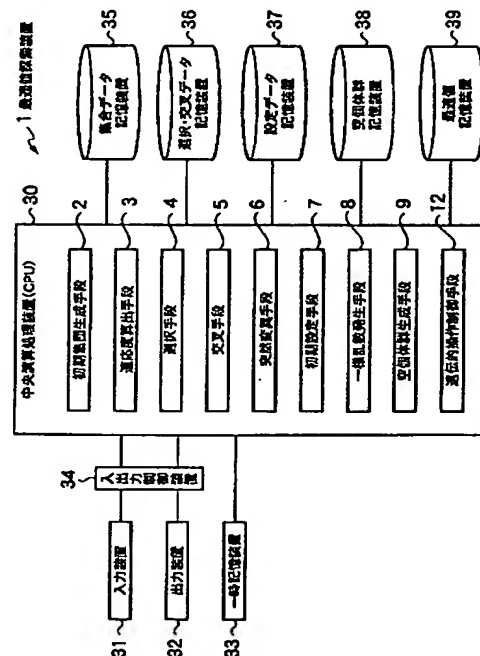
弁理士 三好 秀和 (外7名)

(54) 【発明の名称】 最適値探索装置、最適値探索方法、最適値探索プログラム、パラメータ・フィッティング方法及び半導体装置の製造方法

(57) 【要約】

【課題】 複数の性能指標が与えられた場合に、性能指標間、パラメータ間におけるトレード・オフの関係を保持しつつ、真に最適解を効率的に探索する。

【解決手段】 初期集団を生成する初期集団生成手段2と、初期集団を構成する個体の適応度を算出する適応度算出手段3と、適応度に基づき個体を選択する選択手段4と、個体の要素の一部を交換し新たな個体を生成する交叉手段5と、重み付け公比、突然変異率、及び対象ビット位置を設定する初期設定手段7と、一様乱数を発生する一様乱数発生手段8と、突然変異率が一様乱数よりも小さい場合に、新たな個体においてビット位置のビット内容を変更する突然変異手段6とを含み、複数の特性・性能値の中から最適値を自動的に探索する最適値探索装置である。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、  
前記集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、  
前記適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、  
前記ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成する交叉手段と、  
前記ビット列中のビット位置に依存した突然変異率で前記ビット位置のビット内容を変更する突然変異手段とを含むことを特徴とする最適値探索装置。

【請求項2】 ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、  
前記集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、  
空のビット列を生成する空個体群生成手段と、  
前記適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、  
前記ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成する交叉手段とを含むことを特徴とする最適値探索装置。

【請求項3】 ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、  
前記集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、  
空のビット列を生成する空個体群生成手段と、  
前記適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、  
前記ビット列における交叉位置、交叉区間を決定する交叉位置決定手段と、  
前記ビット列の要素の一部を交叉区間毎に前記空のビット列の対応する交叉区間にコピーし新たなビット列を生成する交叉区間交叉手段とを含むことを特徴とする最適値探索装置。

【請求項4】 ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、  
物理・化学現象の最適値を既定する前記物理・化学的パラメータに適応した性能指標を抽出するステップと、  
前記性能指標を用いて複数個のビット列を選択するステップと、  
前記選択されたビット列の対応するビット位置の要素を交換し新たなビット列を生成するステップと、  
該新たなビット列の要素を上位ビットよりも下位ビットの方が高い確率となるように変更し、突然変異処理を行

うステップとを含み、  
複数の物理・化学的パラメータの中から最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索方法。

【請求項5】 前記突然変異処理を行うステップは、  
重み付け公比、突然変異率、及び対象ビット位置を設定するステップと、  
一様乱数を発生するステップと、  
前記一様乱数が前記突然変異率よりも小さい場合に、前記新たなビット列における対象ビット位置のビット内容を変更するステップと、  
前記突然変異率と前記重み付け公比との積を新たな突然変異率として設定するステップとを少なくとも含むことを特徴とする請求項4記載の最適値探索方法。

【請求項6】 ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、  
物理・化学現象の最適値を既定する前記複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1、第2の性能指標を抽出するステップと、  
前記第1の性能指標に対応した選択確率で第1のビット列を選択するステップと、  
前記第2の性能指標に対応した選択確率で第2のビット列を選択するステップと、  
前記第1の性能指標に対応した選択確率で第3、第4のビット列を選択するステップと、  
前記第2の性能指標に対応した選択確率で第5、第6のビット列を選択するステップと、  
前記第1と前記第2のビット列、前記第3と前記第4のビット列、前記第5と前記第6のビット列の要素の一部を交換し、新たなビット列を生成するステップとを含み、  
複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索方法。

【請求項7】 ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、  
物理・化学現象の最適値を既定する前記複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1乃至第n（nは2以上の整数）の性能指標を算出するステップと、  
複数の空のビット列を生成するステップと、  
前記第1乃至第nの性能指標に対応した選択確率でそれぞれ第1乃至第nのビット列を選択するステップと、  
前記ビット列における交叉位置、交叉区間を決定するステップと、  
第1の交叉区間に係わる第1乃至第nのビット列の内容を順に前記複数の空のビット列の第1の交叉区間にコピーするステップと、  
第1乃至第nのビット列の内容をランダムに入れ替える

ステップと、

入れ替えた第1乃至第nのビット列の第2の交叉区間の内容を順に前記複数の空のビット列の第2の交叉区間にコピーするステップとを含み、

複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索方法。

【請求項8】 初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、交叉手段、突然変異手段、初期設定手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、

ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、物理・化学現象の最適値を既定する前記物理・化学的パラメータに適応した性能指標を抽出する命令と、前記性能指標を用いて複数のビット列を選択する命令と、

前記選択されたビット列の対応するビット位置の要素を交換し新たなビット列を生成する命令と、該新たなビット列の要素を上位ビットよりも下位ビットの方が高い確率となるように変更し、突然変異処理を行う命令とを含み、

複数の物理・化学的パラメータの中から最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索プログラム。

【請求項9】 前記突然変異処理を行う命令は、重み付け公比、突然変異率、及び対象ビット位置を設定する命令と、

一様乱数を発生する命令と、

前記一様乱数が前記突然変異率よりも小さい場合に、前記新たなビット列における対象ビット位置のビット内容を変更する命令と、

前記突然変異率と前記重み付け公比との積を新たな突然変異率として設定する命令とを少なくとも含むことを特徴とする請求項8記載の最適値探索プログラム。

【請求項10】 初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、交叉手段、突然変異手段、初期設定手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、

ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、物理・化学現象の最適値を既定する前記複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1、第2の性能指標を抽出する命令と、

前記第1の性能指標に対応した選択確率で第1のビット列を選択する命令と、

前記第2の性能指標に対応した選択確率で第2のビット列を選択する命令と、

前記第1の性能指標に対応した選択確率で第3、第4のビット列を選択する命令と、

前記第2の性能指標に対応した選択確率で第5、第6のビット列を選択する命令と、

前記第1と前記第2のビット列、前記第3と前記第4のビット列、前記第5と前記第6のビット列の要素の一部を交換し、新たなビット列を生成する命令とを含み、複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索プログラム。

【請求項11】 初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、突然変異手段、初期設定手段、空個体群生成手段、交叉位置決定手段、交叉区間交叉手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、空個体群記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、

ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、

物理・化学現象の最適値を既定する前記複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1乃至第n（nは2以上の整数）の性能指標を算出する命令と、

複数の空のビット列を生成する命令と、

前記第1乃至第nの性能指標に対応した選択確率でそれぞれ第1乃至第nのビット列を選択する命令と、

前記ビット列における交叉位置、交叉区間を決定する命令と、

第1の交叉区間に係わる第1乃至第nのビット列の内容を順に前記複数の空のビット列の第1の交叉区間にコピーする命令と、

第1乃至第nのビット列の内容をランダムに入れ替える命令と、

入れ替えた第1乃至第nのビット列の第2の交叉区間の内容を順に前記複数の空のビット列の第2の交叉区間にコピーする命令とを含み、

複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索することを特徴とする最適値探索プログラム。

【請求項12】 被加工材料に対して物理的もしくは化学的処理を実施する工程と、

前記物理的もしくは化学的処理の結果を測定する工程と、

請求項4、請求項6、又は請求項7の最適値探索方法のいずれか1つを用いて、前記測定により得られた測定データを読み込み、前記測定データに対応したパラメータの値を設定し、複数の前記パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成し、前記パラメータの値を計算し、前記測定データとモデル関数との差の二乗

和を計算し、複数の前記ビット列を選択し、前記ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成することを含む遺伝的操作制御工程とから少なくとも構成され、前記測定データと前記モデル関数の差を最小とするように前記モデル関数を前記測定データにフィッティングすることを特徴とするパラメータ・フィッティング方法。

【請求項13】 被加工材料に対して物理的もしくは化学的处理を実施する工程と、

前記物理的もしくは化学的处理の結果を測定する工程と、

請求項4、請求項6、又は請求項7の最適値探索方法のいずれか1つを用いて、前記測定により得られた測定データを読み込み、前記測定データに対応したパラメータの値を設定し、複数の前記パラメータの配列をビット列として定義し、該ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成し、前記パラメータの値を計算し、前記測定データとモデル関数との差の二乗和を計算し、複数の前記ビット列を選択し、前記ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成することにより、前記測定データにフィッティングするモデル関数を決定する工程と、

該モデル関数を用いてプロセスシミュレーションを行い不純物分布及び形状の少なくとも一方に対応する各製造工程におけるプロセス条件を決定する工程と、

前記プロセス条件に基づいて、複数の製造工程の一連の組み合わせからなる基板工程を半導体基板に対して実施する工程とを少なくとも含むことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、遺伝的アルゴリズムを用いて複数の特性・性能値の最適値を自動的に探索する最適値探索装置、最適値探索方法、最適値探索プログラム、測定結果に対するパラメータ・フィッティング方法及びこれらを用いた半導体装置の製造方法に関する。

【0002】

【従来の技術】半導体集積回路のスイッチング速度（伝搬遅延時間）と消費電力との関係は、互いにトレード・オフの関係にある。電力用半導体装置のスイッチング速度とオン抵抗との関係も互いにトレード・オフ関係にある。また、半導体装置の駆動電流とリーク電流とは互いにトレード・オフの関係にある。このように、半導体装置の開発では、互いに競合する関係（二律背反関係）を持つような特性値のそれぞれを出来るだけ最大、最小にするように不純物密度や寸法などを設計する必要がある。また、実験値（測定値）にモデル関数（フィッティング曲線）をフィッティングする際も、実験値とモデル関数との差が最小になるようにモデル関数のフィッティング・パラメータを選ぶ必要がある。そして、選ばれた

フィッティング・パラメータを調整して、モデル関数を導出し、プロセスシミュレーション等の半導体装置の設計が行われる。このように、半導体装置の設計・開発に際しては、利用に先立って多数の予備実験とその実測結果が用意され、実測との誤差が出来る限り最小になるように、物理・化学モデルを表すモデル関数の複数のフィッティング・パラメータの値を求めてから利用される。

【0003】そこで、このようなパラメータ値の最適な値を求める手法の一つとして、「遺伝的アルゴリズム」と呼ばれる最適化手法が知られている。遺伝的アルゴリズムは、問題の解を記号列として表現した個体を用い、生物の遺伝機構と自然選択を比較的忠実に模擬して、個体集合による離散的な探索空間での適応や最適化を扱う手法である。即ち、自然界では環境に適応した生物が生き残り、子供を産むことや遺伝子の突然変異などでより環境に適した生物が誕生する。このような自然界での適応淘汰の繰り返しにより、環境に適応した遺伝子が残っていくという考え方をモデル化した手法が遺伝的アルゴリズムである。遺伝的アルゴリズムでは、ある世代（ジェネレーション）を形成している個体の集合、即ち、個体群を基本単位として進化を行う。各個体は染色体によって特徴付けられ、染色体は複数個の遺伝子の集まりで構成される。遺伝的アルゴリズムでは、この遺伝子に取り扱う問題のパラメータを割り当てる。

【0004】具体的な処理手順として、まず、処理の始めに初期世代の個体群を生成する。この生成された個体群の中で環境への適応度の高い個体が高い確率で生き残るように選択を行い、さらに交叉や突然変異を行うことで次の世代の個体群が形成される。この操作を予め設定した終了条件を満たすまで続け、終了するまでに得られた最良の個体を問題の準最適解とする。

【0005】このような遺伝的アルゴリズムは、他の手法に比べ計算量は多いものの、与えられた性能指標とそれに影響する複数の実数パラメータに対して、最も望ましい性能指標を与えるパラメータを探索する場合、パラメータ空間での局所的な最適解に陥ることが少なく、性能指標のパラメータに対する偏微分計算が不要で数値ノイズに強い方法として知られている。また、実現する性能指標が複数の場合は、例えば、生成された新たなビット列に対して、非バレード選択と呼ばれる方法で、1つの性能指標値でも他より優れていれば採用する方法を用いて、なるべく多くの性能指標を好ましい値にするパラメータセットを探索する方法が知られている。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】このような遺伝的アルゴリズムを用いて実数パラメータを探索する場合、ビット列としてパラメータ値そのもの又はパラメータの上限値と下限値とで規格化した数値に対応した「1」又は「0」からなる値をそのまま用いると、探索手順をプログラムする際の見通しが良くなる。このためこのような

方法が頻繁に利用される。しかし、この場合、2つ或いはそれ以上のビット列から合成した新たなビット列に対して、突然変異と呼ばれるビットの書き換えを行うと、上位ビットも下位ビットも同じ確率で内容が書き変わってしまう。パラメータ空間では、上位ビットが書き変わった場合は、移動距離が大きくなり、下位ビットが書き変わった場合は、パラメータ空間においてそれほど大きく移動することはない。従って、上位ビットと下位ビットが同じ確率で突然変異を起こしてしまうと、突然変異前のパラメータセットに対応した位置から大きく移動する場合が多数発生してしまう。遺伝的アルゴリズムにおいて、効率的に探索を行うためには、良いパラメータセットの近傍により多くのビット列が集合する状況が必要である。しかし、突然変異を繰り返していくと、このような状況を実現することができなくなり、探索効率が著しく低下してしまう。

【0007】また、実際には、最小化すべき性能指標は複数存在し、それらが互いに相反する状況で、なるべく多くの性能指標に対して最小値を与えるパラメータセットを探索するという形で問題が設定されることが多い。同時に最小化すべき複数の性能指標 $F_1, F_2, \dots, F_N$ が与えられた場合、従来は、例えば、個々に適切な重みを付けた算術和 $\sum w_i \cdot F_N$ を新たな唯一の性能指標とし、この最小値を与えるパラメータを探索する方法が用いられていた。しかし、この方法を用いて探索した場合、恣意的に決められた重み $w_i$ によって最小値を与えるパラメータセットが大きく変わってしまうと共に、性能指標間、或いはパラメータ間のトレードオフの関係が隠されてしまい、多くの場合、真に望む結果を検討するのは容易ではなくなる。

【0008】更に、遺伝的アルゴリズムでは、「複数の性能指標の少なくとも1つが優れているビット列は、次の新たなビット列生成に利用できるように消去しない」という手法が用いられる。この方法は、遺伝的アルゴリズムの長所である「解の候補を複数保持しながら探索を行う」ため、特定の指標のみを最小化する解だけでなく、複数の性能指標をそれなりに小さくするパラメータセットの値が得られる。そして、利用者はこれらの複数の解を見比べながら、自己の目的に最も近い解を選択することができる。しかし、この方法では、あるビット列を残すか消去するかを決める際に、最悪の場合、「ビット列数(N)×パラメータ数(M)回」の大小比較を行う必要があり、その分、処理時間がかかる。また、1つでも他より小さな性能指標を与えるパラメータは生き残るが、現実的な問題に使うと、殆どのビット列がその位置で生き残るため、よりよいパラメータセット近傍への集合が起こりにくく、探索効率が悪い。

【0009】本発明は上述の如き従来の課題を解決するためになされたもので、その目的は、所定の確率で特定のビットの書き換えを行う際に、ビットの位置毎に書換

確率を修正することで、書き換え前のビット列が表すパラメータ空間での位置に対し、書き換え後の位置が大きく移動する割合を低下させることである。

【0010】本発明のその他の目的は、新たに生成したビット列が、大きく異なるパラメータセットに書き換えられ、良好なパラメータセットに関する情報を失う割合を下げることで、効率的な探索を実現することである。

【0011】本発明の更に他の目的は、新たなビット列生成のために必要な個体を複数選択する時に、N番目の性能指標が良いビット列とM番目の性能指標が良いビット列を選択し、NとMについては、全ての組み合わせについてのビット列選択を順次行うことで、個々の性能指標を最も良くするパラメータの値に対応したビット情報を保存しながら、相反する複数の性能指標に対して妥協的な値となるパラメータセットを探索することである。

【0012】

【課題を解決するための手段】上記目的を達成するため、本発明の第1の特徴は、(イ)ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、(ロ)集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、

(ハ)適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、

(ニ)ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成する交叉手段と、(ホ)ビット列中のビット位置に依存した突然変異率で前記ビット位置のビット内容を変更する突然変異手段とを含む最適値探索装置としたことである。

【0013】本発明において、「初期集団生成手段」では、問題の解をコード化し、各個体を特徴づける染色体として表現する。そして、決められた個体数(N個)の染色体を乱数を用いてランダムに生成し、初期集団を生成し、最適値探索装置の中央演算処理装置(CPU)に接続された集合データ記憶装置に格納する。即ち、ここでいう「初期集団」とは、問題の解の集団のことであり、ランダムに作り出されたデータの個体群のことをいう。「適応度算出手段」とは、初期集団の各個体が、問題の解としてどれくらい適しているかを評価する手段であり、予め決定しておいた方法で評価値を求めるための手段である。ここでいう「予め決定しておいた方法」とは、適応度関数、目的関数、評価関数等により各個体の適応度を評価する方法をいい、各個体の適応度は性能指標(評価値)等として表される。算出された適応度は、集合データ記憶装置に格納される。「選択手段」とは、評価手段で求められた評価値(性能指標)に基づき、評価の優劣に応じて個体が一定数残るように取捨選択するための手段である。「交叉手段」とは、選択手段で選択された複数個体の遺伝子を組み換えて、新しい個体を発生させるための手段である。複数の親から、別々の良い形質を受け継ぎより良い遺伝子を作り出すことが交叉の

目的である。「突然変異手段」とは、遺伝子のある部分の値を強制的に換えて、個体集団としての多様性を大きくするための手段であり、遺伝子が局所的な最適解に落ち着いてしまうことを防ぎ、より広い範囲で最適な解を探すための手段である。「初期設定手段」とは、重み付け公比、突然変異を起こす確率（突然変異率）、対象となるビット位置等を設定するための手段である。ここで、公比とは、等比数列における各項の間の比のことをいう。「一様乱数発生手段」とは、0以上1以下の一様乱数 $R$ を発生するための手段である。ここで、一様乱数とは、与えられた範囲の中の値が出現する頻度がどれも等しい乱数のことをいう。「遺伝的操作制御手段」とは、選択手段、交叉手段、突然変異手段の繰り返し処理を制御し、最適な値を見いだすための手段である。本発明では、選択・交叉・突然変異の遺伝的操作を行い、次の世代の集団を生成し、これを繰り返していくことにより問題に対する最適解を探索していく。

【0014】本発明の第1の特徴に係わる最適値探索装置では、遺伝子が局所的な最適解に落ち着いてしまうことを防ぐため、少ない反復回数で全パラメータを真の解に自動的に到達させ、効率的なパラメータ探索を実現することができる。

【0015】本発明の第2の特徴は、(イ)ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、(ロ)集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、(ハ)空のビット列を生成する空個体群生成手段と、(ニ)適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、(ホ)ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成する交叉手段とを含む最適値探索装置としたことである。

【0016】本発明において、「空個体群生成手段」とは、初期集団と同じサイズの空の個体の集合（個体群）を生成するための手段である。ここでは、初期集団と同じ要素から成る、同じサイズの空の配列 $B_1, B_2, \dots, B_N$ が生成される。

【0017】本発明の第2の特徴に係わる最適値探索装置では、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0018】本発明の第3の特徴は、(イ)ビット表現された複数のパラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成する初期集団生成手段と、(ロ)集合を構成するビット列の適応度を算出する適応度算出手段と、(ハ)空のビット列を生成する空個体群生成手段と、(ニ)適応度に基づきビット列を選択する選択手段と、(ホ)ビット列における交叉位置、交叉区間を決定する交叉位置決定手段と、(ヘ)ビット列の要素の一部を交叉区間毎に空のビット列の対応する交叉区間にコピー

し新たなビット列を生成する交叉区間交叉手段とを含む最適値探索装置としたことである。

【0019】本発明において、「空個体群生成手段」とは、初期集団と同じ要素からなる同じサイズの空の配列 $B_1, B_2, \dots, B_N$ を生成したり、交叉に用いるための別の空のビット列 $G_1', G_2', \dots, G_N$ を生成するための手段である。「交叉位置決定手段」とは、対象となるビット位置、即ち、交叉する位置を決定するための手段である。

【0020】「交叉区間交叉手段」とは、交叉位置決定手段で決定された交叉位置と交叉位置との間の各交叉区間を、交叉させるための手段である。

【0021】本発明の第3の特徴に係わる最適値探索装置では、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0022】本発明の第4の特徴は、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する物理・化学的パラメータに適応した性能指標を抽出するステップと、(ハ)性能指標を用いて複数個のビット列を選択するステップと、(ニ)選択されたビット列の対応するビット位置の要素を交換し新たなビット列を生成するステップと、(ホ)新たなビット列の要素を上位ビットよりも下位ビットの方が高い確率となるように変更し、突然変異処理を行うステップとを含み、複数の物理・化学的パラメータの中から最適値を自動的に探索する最適値探索方法としたことである。

【0023】本発明の第4の特徴に係わる最適値探索方法では、突然変異率に重み付けを行い、ビット列に重み付けを行うことによって、上位ビットに対し下位ビットがより高い確率で反転していくことになるため、遺伝子が局所的な最適解に落ち着いてしまうことが防止され、少ない反復回数で全パラメータを真の解に自動的に到達させ、効率的なパラメータ探索を実現することができる。

【0024】本発明の第5の特徴は、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1、第2の性能指標を抽出するステップと、(ハ)第1の性能指標に対応した選択確率で第1のビット列を選択するステップと、(ニ)第2の性能指標に対応した選択確率で第2のビット列を選択するステップと、(ホ)第1の性能指標に対応した選択確率で第3、第4のビット列を選択するステップと、

(ヘ)第2の性能指標に対応した選択確率で第5、第6のビット列を選択するステップと、(ト)第1と第2の



ビット列、第3と第4のビット列、第5と第6のビット列の要素の一部を交換し、新たなビット列を生成するステップとを含み、複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索する最適値探索方法としたことである。

【0025】本発明の第5の特徴に係わる最適値探索方法では、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0026】本発明の第6の特徴は、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成するステップと、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1乃至第n (nは2以上の整数)の性能指標を算出するステップと、(ハ)複数の空のビット列を生成するステップと、(ニ)第1乃至第nの性能指標に対応した選択確率でそれぞれ第1乃至第nのビット列を選択するステップと、(ホ)ビット列における交叉位置、交叉区間を決定するステップと、(ヘ)第1の交叉区間に係わる第1乃至第nのビット列の内容を順に複数の空のビット列の第1の交叉区間にコピーするステップと、(ト)第1乃至第nのビット列の内容をランダムに入れ替えるステップと、(チ)入れ替えた第1乃至第nのビット列の第2の交叉区間の内容を順に複数の空のビット列の第2の交叉区間にコピーするステップとを含み、複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索する最適値探索方法としたことである。

【0027】本発明の第6の特徴に係わる最適値探索方法では、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0028】本発明の第7の特徴は、初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、交叉手段、突然変異手段、初期設定手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する物理・化学的パラメータに適応した性能指標を抽出する命令と、(ハ)性能指標を用いて複数個のビット列を選択する命令と、(ニ)選択されたビット列の対応するビット位置の要素を交換し新たなビット列を生成する命令と、(ホ)新たなビット列の要素を上位ビットよりも下位ビットの方が高い確率となるように変更し、突然変異処理を行う命令とを含み、(ヘ)複数の物理・化学的パラメータの中から最適値を自動的に探索する最適値探索プログラムとしたことである。

【0029】本発明の第7の特徴に係わる最適値探索プログラムでは、突然変異率に重み付けを行い、ビット列に重み付けを行うことによって、上位ビットに対し下位

ビットがより高い確率で反転していくことになるため、遺伝子が局所的な最適解に落ちてしまうことが防止され、少ない反復回数で全パラメータを真の解に自動的に到達させ、効率的なパラメータ探索を実現することができる。

【0030】本発明の第8の特徴は、初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、交叉手段、突然変異手段、初期設定手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1、第2の性能指標を抽出する命令と、

(ハ)第1の性能指標に対応した選択確率で第1のビット列を選択する命令と、(ニ)第2の性能指標に対応した選択確率で第2のビット列を選択する命令と、(ホ)第1の性能指標に対応した選択確率で第3、第4のビット列を選択する命令と、(ヘ)第2の性能指標に対応した選択確率で第5、第6のビット列を選択する命令と、(ト)第1と第2のビット列、第3と第4のビット列、第5と第6のビット列の要素の一部を交換し、新たなビット列を生成する命令とを含み、複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索する最適値探索プログラムとしたことである。

【0031】本発明の第8の特徴に係わる最適値探索プログラムでは、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0032】本発明の第9の特徴は、初期集団生成手段、適応度算出手段、選択手段、突然変異手段、初期設定手段、空個体群生成手段、交叉位置決定手段、交叉区間交叉手段を含むとともに、集合データ記憶装置、選択・交叉データ記憶装置、設定データ記憶装置、空個体群記憶装置、最適値記憶装置に接続された最適値探索装置を制御するためのプログラムであって、(イ)ビット表現された複数の物理・化学的パラメータの配列をビット列として定義し、ビット列の各要素にランダムな値を設定したビット列を複数個生成する命令と、(ロ)物理・化学現象の最適値を既定する複数の物理・化学パラメータにそれぞれ適応した第1乃至第n (nは2以上の整数)の性能指標を算出する命令と、(ハ)複数の空のビット列を生成する命令と、(ニ)第1乃至第n性能指標に対応した選択確率でそれぞれ第1乃至第nのビット列を選択する命令と、(ホ)ビット列における交叉位置、交叉区間を決定する命令と、(ヘ)第1の交叉区間に係わる第1乃至第nのビット列の内容を順に複数の空のビット列の第1の交叉区間にコピーする命令と、(ト)第

1乃至第nのビット列の内容をランダムに入れ替える命令と、(チ) 入れ替えた第1乃至第nのビット列の第2の交叉区間の内容を順に複数の空のビット列の第2の交叉区間にコピーする命令とを含み、複数の性能指標に対応した最適値を自動的に探索する最適値探索プログラムとしたことである。

【0033】本発明の第9の特徴に係わる最適値探索プログラムでは、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。

【0034】本発明の第10の特徴は、(イ) 被加工材料に対して物理的もしくは化学的処理を実施する工程と、(ロ) 物理的もしくは化学的処理の結果を測定する工程と、(ハ) 請求項4、請求項6、又は請求項7の最適値探索方法のいずれか1つを用いて、測定により得られた測定データを読み込み、測定データに対応したパラメータの値を設定し、複数の前記パラメータの配列をビット列として定義し、そのビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成し、パラメータの値を計算し、測定データとモデル関数との差の二乗和を計算し、複数のビット列を選択し、ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成することを含む遺伝的操作制御工程とから少なくとも構成され、測定データとモデル関数の差を最小とするようにモデル関数を測定データにフィッティングするパラメータ・フィッティング方法としたことである。

【0035】本発明において、「測定データとモデル関数との差の二乗和」とは「残差」とも言い、測定データとモデル関数との誤差のことを意味する。

【0036】本発明の第10の特徴に係わる測定結果に対するパラメータ・フィッティング方法では、実験曲線のフィッティング時に残差(誤差)を最小にする最適解を求めることにより、最適なモデル関数(フィッティング曲線)を探索することができる。このため、正確なプロセスシミュレーションを行うことが可能となる。

【0037】本発明の第11の特徴は、(イ) 被加工材料に対して物理的もしくは化学的処理を実施する工程と、(ロ) 物理的もしくは化学的処理の結果を測定する工程と、(ハ) 請求項4、請求項6、又は請求項7の最適値探索方法のいずれか1つを用いて、測定により得られた測定データを読み込み、測定データに対応したパラメータの値を設定し、複数のパラメータの配列をビット列として定義し、そのビット列の要素にランダムな値を設定した複数のビット列の集合を生成し、パラメータの値を計算し、測定データとモデル関数との差の二乗和を計算し、複数のビット列を選択し、ビット列の要素の一部を交換し新たなビット列を生成することにより、測定データにフィッティングするモデル関数を決定する工程と、(ニ) そのモデル関数を用いてプロセスシミュレーションを行い不純物分布及び形状の少なくとも一方に対

応する各製造工程におけるプロセス条件を決定する工程と、(ホ) プロセス条件に基づいて、複数の製造工程の一連の組み合わせからなる基板工程を半導体基板に対して実施する工程とを少なくとも含む半導体装置の製造方法としたことである。

【0038】本発明の第11の特徴に係わる半導体装置の製造方法では、測定結果に対するパラメータ・フィッティング方法において見いだされた最適なモデル関数

(フィッティング曲線、または性能指標ともいう)を用いたシミュレーションを行うため、異なる条件を用いた場合の影響を簡単にシミュレートすることができ、最適なプロセス条件を短時間で自動的に探索することができる。このため、高精度な半導体集積回路の解析及び回路シミュレーションが必要な複雑な半導体集積回路の研究(設計)から開発までのループの周期を飛躍的に短縮することができる。

【0039】

【発明の実施の形態】次に、図面を参照して、本発明の実施形態について説明する。以下の図面の記載において、同一又は類似の部分には、同一又は類似の符号を付している。

【0040】(最適値探索装置) 図1に示す本発明の実施の形態に係わる最適値探索装置1は、中央演算処理装置(CPU)30とCPU30に入出力制御装置34を介して接続された入力装置31及び出力装置32と、CPU30に接続された集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39及び一時記憶装置(主記憶装置)33とから少なくとも構成されている。CPU30には、図示を省略したデータベース管理手段が備えられている。そして、集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39との入出力が必要な場合は、このデータベース管理手段を介して、必要なファイルの格納場所を探し、ファイルの読み出し・書き込み処理がなされる。

【0041】CPU30には、初期集団生成手段2、適応度算出手段3、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6、初期設定手段7、一様乱数発生手段8、空個体群生成手段9、遺伝的操作制御手段12が少なくとも含まれている。初期集団生成手段2は、問題の解をコード化し、各個体を特徴づける染色体として表現する。そして、決められた個体数(N個)の染色体を乱数を用いてランダムに生成し、初期集団を生成する。適応度算出手段3は、初期集団の各個体が、問題の解としてどれくらい適しているかを評価する手段であり、予め決定しておいた方法で評価値を求めるための手段である。ここでいう「予め決定しておいた方法」とは、適応度関数、目的関数、評価関数等により各個体の適応度を評価する方法をいい、各個体の適応度は性能指標(評価値)等として



表される。選択手段4は、適応度算出手段3で求められた評価値（性能指標）に基づき、評価の優劣に応じて個体が一定数残るように取捨選択するための手段である。選択の方法としては、ルーレット方式、ランク方式、トーナメント方式、エリート保存方式等がある。交叉手段5は、選択手段4で選択された複数個体の遺伝子を組み換えて、新しい個体を発生させるための手段である。複数の親から、別々の良い形質を受け継ぎより良い遺伝子を作り出すことが交叉の目的である。突然変異手段6は、遺伝子のある部分の値を強制的に換えて、個体集団としての多様性を大きくするための手段であり、遺伝子が局所的な最適解に落ち着いてしまうことを防ぎ、より広い範囲で最適な解を探すための手段である。初期設定手段7は、重み付け公比、突然変異を起こす確率（突然変異率、又は書換確率）等を設定するための手段である。一様乱数発生手段8は、0以上1以下の一様乱数Rを発生するための手段である。空個体群生成手段9は、初期集団生成手段2で生成した初期集団の個体群と同じ大きさの個体群を生成する手段である。遺伝的操作制御手段12は、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6の繰り返し処理を制御し、最適な値を見いだすための手段である。

【0042】入力装置31は、キーボード、マウス、OCR等の認識装置、イメージスキャナ等の図形入力装置、音声認識装置等の特殊入力装置などにより、出力装置32は、液晶ディスプレイ、CRTディスプレイ等の表示装置、インクジェットプリンタ、レーザープリンタなどの印刷装置等によりそれぞれ構成される。入出力制御装置（入出力インタフェース）34は、これらの入力装置31、出力装置32、あるいは図示を省略したCD-ROM、MO、ZIPなどの記憶装置の読み取り装置等をCPU30につなぐインタフェースである。データの流れから見ると、入出力制御装置34は、入力装置31、出力装置32、外部記憶装置の読み取り装置と一時記憶装置（主記憶装置）33とのインタフェースとなる。一時記憶装置（主記憶装置）33には、ROM及びRAMが組み込まれている。ROMは、CPU30において実行されるプログラムを格納しているプログラム記憶装置等として機能する。RAMは、CPU30におけるプログラム実行処理中に利用されるデータ等を一時的に格納したり、作業領域として利用される一時的なデータメモリ等として機能する。集合データ記憶装置35は、初期集団生成手段2で生成した初期集団のデータ、適応度算出手段3で算出した初期集団の適応度のデータ、突然変異手段6で生成された新たな個体で構成される新たな集団のデータを格納するための記憶装置である。選択・交叉データ記憶装置36は、選択手段4で選択された個体のデータ、交叉手段5で生成された新たな個体のデータを格納しておくための記憶装置である。設定データ記憶装置37は、初期設定手段7及び一様乱数

発生手段8などで生成されたデータを格納しておくための記憶装置である。空個体群記憶装置38は、空個体群生成手段9で生成した空の個体を格納しておくための記憶装置である。最適値記憶装置39は、最終的に遺伝的操作制御手段12で、生成された最適値（解）を格納するための記憶装置である。

【0043】尚、空個体群生成手段9を用いて生成した空の集合Bを用いずに、選択した個体を交叉させるその他の方法を用いても良く、図示した構造に限定されるものではない。集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39は、CPU30の内部に収納されていても良く、CPU30の外部記憶装置として接続されていても良い。また、データベースサーバ等を介して接続されていても良い。

【0044】（遺伝的アルゴリズム全体のフロー）次に、図2を用いて、本発明の実施の形態に係わる遺伝的アルゴリズムをパラメータの最適化問題に適用した場合の全体の流れを説明する。

【0045】（イ）まず、ステップS100において、入力装置31から入力データを読み込む。

【0046】（ロ）次に、ステップS101において、初期集団生成手段2にて、乱数を用いてそれぞれM個のパラメータ $P_1, P_2, \dots, P_M$ に対応したビット列（個体） $G_1, G_2, \dots, G_N$ をN個生成し、集合データ記憶装置35に格納する。これは、一般的に「初期集団の生成」と呼ばれるステップである。生物は、ある染色体がその個体の特徴を詳細に決めていることから、遺伝的アルゴリズムでは、問題における複数のパラメータ $P_1, P_2, \dots, P_M$ を遺伝子とし、複数のパラメータ $P_1, P_2, \dots, P_M$ を図16の染色体（個体）50のように並べて二進数に直したものを染色体とする。そして、集団における個体数（N）を決めた後、ランダムな値を持つ染色体を個体数（N）個作り、初期集団として、集合データ記憶装置35に格納する。

【0047】（ハ）次に、ステップS102において、適応度算出手段3にて、各ビット列 $G_j$ について性能指標 $F_j = F(P_j)$ 、即ち性能指標 $F_1, F_2, \dots, F_K$ （ $K \geq 2$ ）を計算する。そして、ステップS103において、ビット列 $G_1, G_2, \dots, G_N$ 、パラメータセット $P_1, P_2, \dots, P_M$ 、性能指標 $F_1, F_2, \dots, F_K$ の対からなるデータを要素としたN個の要素（個体）からなる集合Aを作成し、集合データ記憶装置35に格納する。このとき、集合Aは、典型的には、 $N = 500$ 個から2000個の要素から構成される。そして、ステップS104において、空個体群生成手段9にて、同様の要素からなる同じサイズの空の集合（配列）Bを用意する。尚、ステップS102の処理は、一般的に「各個体の適応度の評価」と呼ばれるステップであ

り、各個体の適応度を予め定めた方法で計算するものである。計算結果は、集合データ記憶装置35に格納される。

【0048】(二) 次に、ステップS105において、選択手段4にて、性能指標 $F_j$ に反比例した選択確率で、集合Aからビット列 $G_1$ 、 $G_2$ をランダムに選択し、集合データ記憶装置35に格納する。これは、「選択(淘汰)」と呼ばれる処理であり、次のステップで交叉を行う個体の生存分布を決定すべく行われる。ここでは、適応度の低い個体は淘汰され、その個数だけ適応度の高い個体のみが増殖することとなる。選択方法としては、ルーレット選択、期待値選択、ランキング選択、トーナメント選択、エリート保存選択などの方法があるが、本発明の実施の形態では、ルーレット選択を使用する。ルーレット選択は、適応度比例選択と呼ばれることもあり、個体群の中の各個体の適応度とその総計を求めて、適応度の総計に対する各個体の割合を選択確率として個体を選択する。尚、選択方法としてその他の方法を用いて選択しても構わない。選択された個体は選択・交叉データ記憶装置36に格納される。

【0049】(ホ) 次に、ステップS106において、交叉手段5にて、ランダムに選んだ位置でビット列 $G_1$ と $G_2$ を所定回数交叉させ、新たなビット列 $K_1$ と $K_2$ を生成し、集合データ記憶装置35に格納する。これは、「交叉」と呼ばれる処理であり、選択された遺伝子を組み換え、新しい個体を発生するステップである。生成した新しい個体は、選択・交叉データ記憶装置36に格納される。

【0050】(ヘ) 次に、ステップS107において、突然変異手段6にて、ビット列 $K_1$ と $K_2$ の各ビットについて、所定の確率で「1」は「0」、「0」は「1」に書き換え、新たなビット列 $K_1'$ 、 $K_2'$ を生成する。これは、「突然変異」と呼ばれ、交叉だけでは個体の親に依存するような限られた範囲の子しか生成することはできないため、突然変異により、染色体上のある遺伝子を一定の確率で他の対立遺伝子に置き換える操作を行う。これにより、交叉だけでは生成できない子を生成して、個体群の多様性を維持することができる。

【0051】(ト) 次に、ステップS108において、 $K_1'$ 、 $K_2'$ のそれぞれに対応したパラメータセットの値である $P_{K1}$ 、 $P_{K2}$ を計算し、 $P_{K1}$ 、 $P_{K2}$ のそれぞれに応じた性能指標 $F_{K1}=F(P_{K1})$ 、 $F_{K2}=F(P_{K2})$ を計算する。そして、 $K_1'$ 、 $P_{K1}$ 、 $F_{K1}$ と、 $K_2'$ 、 $P_{K2}$ 、 $F_{K2}$ を集合Bの要素として集合データ記憶装置35に格納する。ステップS108の処理は、「性能指標計算」もしくは「適応度計算」と呼ばれる処理であり、性能指標関数(「適応度関数」ともいわれる)は個体の適応度を示すものである。

【0052】(チ) 次に、ステップS109において、ステップS105からS108の処理をN/2回繰り返す

たか否かを、遺伝的操作制御手段12を用いて判断する。N/2回繰り返していない場合は、ステップS105の処理へ戻る。N/2回繰り返している場合は、次のステップS110の処理に進む。

【0053】(リ) 次に、ステップS110において、 $F_r < F_s$ の場合は、集合Aで最小の性能指標 $F_r$ を持つ要素を、集合Bで最大の性能指標 $F_s$ を持つ要素にコピーする。そして、集合Aを集合Bの内容で置き換える。集合A及びBのデータは、集合データ記憶装置35に格納される。

【0054】(ヌ) 次に、ステップS111において、ステップS105からステップS110までの処理を所定回数繰り返したか否かが判断される。所定回数繰り返していない場合は、ステップS105の処理へ戻る。通常、20回から100回程度繰り返すことになる。そして、所定回数繰り返したら、ステップS112において最終結果を出力し、最終結果を最適値記憶装置39に格納し、終了する。

【0055】尚、図2のフロー図では図示を省略したが、パラメータセット或いは一部のパラメータの初期値が与えられた場合、計算に用いるN個のビット列の一部、例えば10~20%は、初期値で定まるパラメータ空間の点を中心にして、所定範囲にランダムに配置、またはこのパラメータ空間の点を中心にして所定の分散を持つ分布曲線、例えば、ガウス分布で配置する。そして、その他の部分については、パラメータの全空間に亘り、一様にランダムに配置させることによって、与えられた初期値近傍に重点を置いた探索も行われ得る。

【0056】また、図2のフロー図では図示を省略したが、パラメータセットの探索範囲をパラメータ空間の特定領域、例えば原点を中心とした半径1の超球の内部などに限定したい場合には、ステップS107の操作の後で得られるパラメータセットが所定領域に存在しない場合、パラメータセットがこの領域に含まれるか、所定回数に達するまで、ステップS105からステップS110の操作を反復させ、所定回数を超えても出来ない場合にはそのビット列を廃棄して、一様乱数を用いてこの領域内となるパラメータセットを新たに発生させる処置を追加する場合もある。このようにすることによって、パラメータセットに複雑な制約条件を持たせることが容易に実現できる。

【0057】(第1の実施の形態) 図3に、遺伝子の組み合わせごとに個体の適応度をプロットした「適応度地形40」を示す。この適応度地形40では、プロット位置が高いほど、遺伝的アルゴリズムの個体の適応度は高くなる。このような適応度地形40を用いて遺伝的アルゴリズムの概念を考えてみた場合、遺伝的アルゴリズムにおける親の選択は、適応度地形40の高い位置にいるものを優先的に選択するメカニズムである。そして、このメカニズムによって選ばれた遺伝子の組み合わせを、

突然変異や交叉によって変化させる。

【0058】たとえば、図3において、点bが最適値42であり、最終的に到達すべき点であるとする。このとき、点a、点c、点dは、局所解44であると言える。ここで、「突然変異」とは、点pから点r、点i等の点にジャンプさせることである。即ち、遺伝子の一部を変えることによって、適応度地形40のある一点からある一点へとジャンプさせることが突然変異である。そして、新しい場所の適応度が高ければ再度選択されやすくなるが、低ければ選択されにくくなる。このようにして、突然変異と自然淘汰というメカニズムは生物個体の適応度を徐々に高めていく効果がある。

【0059】しかし、実際には、突然変異だけで適応度を高くすることは困難である。そこで、「交叉」を行う。交叉は、一方の遺伝子の一部と他方の遺伝子の一部を組み合わせることによって行われる。親として選択されているのであるから、この二つの個体は高い適応度を示している場合が多い。従って、適応度を高くするような遺伝子同士を組み合わせることによって、より高い適応度の個体が生まれる可能性が出てくるのである（これは、スキーマ定理により数学的に証明されている。）。

【0060】図3に示す適応度地形40の探索空間41（x座標に対応する第1のパラメータと、y座標に対応する第2のパラメータとの2つのパラメータからなるパラメータ空間）において、最適値を探索する場合、最適値42（点b）を探索するための理想的な探索範囲43とは、図3に示すような、点e、点f、点gを含むような範囲である。この理想的な探索範囲43を見いだすためには、親となる点が、近くでジャンプしていくことが望ましい。たとえば、点pより突然変異を行う場合において、点rや点q等の遠くの点にジャンプしてしまうよりも、点iや点m等、近くの点にジャンプすることが好ましい。更に、点iにおいて突然変異を行う場合には、点rや点qにジャンプするよりも、点sや点gにジャンプすることが好ましい。そこで本発明の第1の実施の形態では、探索空間41（パラメータ空間）上において突然変異させる場合、基となる点（親）の近くの点にジャンプさせるために、ビット列毎に書換確率（突然変異率）に重み付けを行うことにする。即ち、ある一定の確率で突然変異を起こすのである。

【0061】突然変異は、個体に対する遺伝子操作の一つで、遺伝子情報の一部をある確率で変化させることであり、突然変異を起こすことで、個体群が局所安定に陥りにくくなる。突然変異は、あらかじめ決めておいた生起確率に従って、各遺伝子ごとに起こる。図4はx座標に対応するパラメータとy座標に対応するパラメータを並べて、それぞれ2進数で表現したものである。図4に示すように、「0」と「1」から形成された遺伝子型45において、突然変異とは、ある一定の確率で、「0」が「1」とし、「1」が「0」とすることである。こ

で、個体のx座標に対応したパラメータの上位ビット46が変化した場合、適応度地形40におけるx座標値の変化が大きくなってしまふ。逆に、個体のx座標に対応したパラメータの下位ビット47が変化した場合の適応度地形40におけるx座標値の変化は小さい。

【0062】そこで、本発明の第1の実施の形態では、(x,y)座標からなる適応度地形40において、なるべく近くの探索範囲にいる遺伝子を生成するために、座標値(x,y)の変化が小さくなるよう、突然変異率（書換確率）rに、だんだん小さくなるように重みをつけることとした。たとえば、 $r \times 10\%$ 、 $r \times 102\%$ 、 $r \times 103\% \dots$ というように書換確率rに重み付けをすることによって、下位ビットが変化するように設定する。

【0063】（重み付け）このような重み付けの方法を図5及び図6を用いて、以下に説明する。図5は、図2のステップS107の突然変異の処理において、書換確率（突然変異確率）rに重み付けを行う方法の手順を示したフローチャートである。本発明の第1の実施の形態では、「1」又は「0」からなる列で表されたM個のパラメータの各パラメータにおいて、ビット毎の重みを等比級数的（等比数的）に変化させる方法の手順について説明する。ここで、等比級数または等比数とは、ある項と次の項の比が等しい数列のことをいう。例えば、 $\{a_n\} = \{2, 4, 8, 16, 32, 64 \dots\}$ という数列で、ある項から次の項になるには、「2」倍されている（前の項に「2」を掛けている）ことになる。

【0064】（イ）始めに、ステップS131において、初期設定手段7を用いて、0以上1以下の公比 $b_w$ を設定する。設定された公比 $b_w$ は、設定データ記憶装置37に記憶される。ここで、公比 $b_w$ とは、上述した数列 $a_n$ の比のことをいう。従って、上の例では、 $a_n$ の公比 $b_w$ は「2」である。

【0065】（ロ）次に、ステップS132において、書き換え対象のビット位置を示す整数kを1に設定する。設定されたビット位置kは、設定データ記憶装置37に格納される。そして、ステップS133において、突然変異手段6にて、書換確率（突然変異率）を所定の値rに設定する。

【0066】（ハ）次に、ステップS134において、一様乱数発生手段8を用いて、0以上1以下の一様乱数Rを発生させ、設定データ記憶装置37に格納する。

【0067】（ニ）ステップS135において、一様乱数Rが書換確率rよりも小さいか否かを遺伝的操作制御手段12を用いて判断する。一様乱数Rが書換確率rよりも小さい場合（ $R < r$ の場合）は、ステップS136において、下位からk番目のビットの内容を「0」なら「1」に、「1」なら「0」に反転させ、ステップS137の処理へ進む。Rがrよりも大きい場合（ $R > r$ の場合）は、ステップS137の処理へ進む。

【0068】(ホ) ステップS137において、初期設定手段7を用いて $r$ と $b_w$ との積( $r \times b_w$ )を新たな $r$ として設定する。また、ビット位置を示す整数 $k$ の値に1を足す。

【0069】(ヘ) ステップS138において、遺伝的操作制御手段12を用いて、1つのパラメータを表す全てのビットについて処理が行われたか否かを判断する。行われていない場合は、ステップS133からステップS137までの処理を繰り返す。全てのビットについて処理が終了している場合は、ステップS139において、全てのパラメータについて処理が終了しているか否かを判断する。全てのパラメータについて処理が終了していない場合は、ステップS131からS138までの処理を繰り返す。全てのパラメータについて処理が終了している場合は、重み付け処理を終了する。

【0070】上述したように、本発明の第1の実施の形態では、 $r_n = r \cdot (b_w)^{n-1}$ という重み付けを行っている。即ち、初め( $k$ 番目)のビットでの書換確率は、 $r$ であるが、次( $(k+1)$ 番目)のビットでの書換確率は、 $r \cdot (b_w)$ であり、その次( $(k+2)$ 番目)のビットでの書換確率は $r \cdot (b_w)^2$ 、更にその次( $(k+3)$ 番目)のビットでの書換確率は $r \cdot (b_w)^3$ となる。

【0071】本発明の第1の実施の形態では、説明を簡単にするため、ビット毎の内容書き換えの確率を等比級数的に変化させる場合の処理手順について説明したが、他の重み分布を用いて書換確率をビット毎に変更する場合も、類似の手順で処理することが可能である。

【0072】図6(a)には上述したような本発明の第1の実施の形態に係わる探索方法を用いた場合におけるパラメータ値の推移を、図6(b)には従来の方で最適値を探索した場合におけるパラメータ値の推移をそれぞれ示す。図6(a)及び(b)の双方において、パラメータ値が「1」に近づくことと最適値に近づいたことになる。ビット列に重みを付けて探索した場合、図6(a)に示すように、図6(b)の従来の方よりも早い段階でパラメータ値が「1」に近づくことが可能となる。

【0073】このように、本発明の第1の実施の形態に係わる探索方法を用いて突然変異を行う場合に、ビット列に等比級数的に重み付けをすることによって、上位ビットに対し下位ビットがより高い確率で反転していくことになるため、適応度地形40において、近い探索範囲内で次の世代の子を生成することができる。探索範囲内で子を生成していくことにより、従来よりも少ない反復回数で全パラメータを真の解に到達させることができる。

【0074】(第2の実施の形態) 図7に示す本発明の実施の形態に係わる最適値探索装置1は、中央演算処理装置(CPU)30とCPU30に入出力制御装置34を介して接続された入力装置31及び出力装置32と、CPU30に接続された集合データ記憶装置35、選択

・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39及び一時記憶装置(主記憶装置)33とから少なくとも構成されている。CPU30には、図示を省略したデータベース管理手段が備えられている。そして、集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39との入出力が必要な場合は、このデータベース管理手段を介して、必要なファイルの格納場所を探し、ファイルの読み出し・書き込み処理がなされる。

【0075】CPU30には、初期集団生成手段2、適応度算出手段3、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6、初期設定手段7、一様乱数発生手段8、空個体群生成手段9が少なくとも含まれている。初期集団生成手段2は、問題の解をコード化し、各個体を特徴づける染色体として表現する。そして、決められた個体数( $N$ 個)の染色体を乱数を用いてランダムに生成し、初期集団を生成する。適応度算出手段3は、初期集団の各個体が、問題の解としてどれくらい適しているかを評価する手段であり、予め決定しておいた方法で評価値を求めるための手段である。選択手段4は、適応度算出手段で求められた評価値(性能指標)に基づき、評価の優劣に応じて個体が一定数残るように取捨選択するための手段である。交叉手段5は、選択手段で選択された複数個体の遺伝子を組み換えて、新しい個体を発生させるための手段である。突然変異手段6は、遺伝子のある部分の値を強制的に換えて、個体集団としての多様性を大きくするための手段であり、遺伝子が局所的な最適解に落ちてしまうことを防ぎ、より広い範囲で最適解を探すための手段である。初期設定手段7は、重み付け公比、突然変異を起こす確率(突然変異率、又は書換確率)等を設定するための手段である。一様乱数発生手段8は、0以上1以下の一様乱数 $R$ を発生するための手段である。空個体群生成手段9は、初期集団生成手段2で生成した初期集団の個体群と同じ大きさの個体群を生成する手段である。遺伝的操作制御手段12は、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6の繰り返し処理を制御し、最適値を見いだすための手段である。

【0076】入力装置31は、キーボード、マウス、OCR等の認識装置、イメージスキャナ等の図形入力装置、音声認識装置等の特殊入力装置などにより、出力装置32は、液晶ディスプレイ、CRTディスプレイ等の表示装置、インクジェットプリンタ、レーザープリンタなどの印刷装置等によりそれぞれ構成される。入出力制御装置(入出力インタフェース)34は、これらの入力装置31、出力装置32、あるいは図示を省略したCD-ROM、MO、ZIPなどの記憶装置の読み取り装置等をCPU30につなぐインタフェースである。データの流れから見ると、入出力制御装置34は、入力装置31、出力装置32、外部記憶装置の読み取り装置と一時

記憶装置（主記憶装置）33とのインタフェースとなる。一時記憶装置（主記憶装置）33には、ROM及びRAMが組み込まれている。ROMは、CPU30において実行されるプログラムを格納しているプログラム記憶装置等として機能する。RAMは、CPU30におけるプログラム実行処理中に利用されるデータ等を一時的に格納したり、作業領域として利用される一時的なデータメモリ等として機能する。集合データ記憶装置35は、初期集団生成手段2で生成した初期集団のデータ、適応度算出手段3で算出した初期集団の適応度のデータ、突然変異手段6で生成された新たな個体で構成される新たな集団のデータを格納するための記憶装置である。選択・交叉データ記憶装置36は、選択手段4で選択された個体のデータ、交叉手段5で生成された新たな個体のデータを格納しておくための記憶装置である。設定データ記憶装置37は、初期設定手段7及び一様乱数発生手段8などで生成されたデータを格納しておくための記憶装置である。空個体群記憶装置38は、生成した空の個体を格納しておくための記憶装置である。最適値記憶装置39は、最終的に遺伝的操作制御手段12で、生成された最適値（解）を格納するための記憶装置である。

【0077】尚、集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39は、CPU30の内部に収納されていても良く、CPU30の外部記憶装置として接続されていても良い。また、データベースサーバ等を介して接続されていても良く、図示した構造に限定されるものではない。

【0078】次に、図2及び図8乃至図10を用いて、複数の性能指標関数を同時に最適化するパラメータセットの第1の探索手順について以下に説明する。図8は、図2のステップS105乃至S109に該当する処理である。尚、説明を簡素化するために、3個の性能指標（関数） $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ が与えられた場合の探索処理手順を以下に示す。また、 $N$ は $2 \cdot 3 C_2 = 2 \times 6 = 12$ の倍数とする。

【0079】（イ）まず、図2のステップS100で入力データを読み込み、ステップS101において、初期集団生成手段2を用いて、初期集団として、一様乱数を用いてパラメータセット $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_M$ を持つビット列 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\dots$ 、 $G_N$ を $N$ 個生成する。そして、ステップS102において、各ビット列について性能指標 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ を計算する。そして、ステップS103において、ビット列 $G_1$ 、 $G_2$ 、 $\dots$ 、 $G_N$ 、性能指標 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ 、パラメータセット $P_1$ 、 $P_2$ 、 $\dots$ 、 $P_M$ の3つを1つの構成要素とする、 $N$ 個の要素（個体）からなる集合 $A$ を作成し、集合データ記憶装置35に格納する。そして、ステップS104において、空個体群生成手段9を用いて、同様の要素から

成る同じサイズの空の配列（個体） $B_1$ 、 $B_2$ 、 $\dots$ 、 $B_N$ を用意し、空個体群記憶装置38に格納する。

【0080】（ロ）次に、図8のステップS141において、選択手段4を用いて、 $F_1$ の値に反比例した選択確率で、ビット列（個体） $G_{a1}$ を選択する。また、 $F_2$ の値に反比例した選択確率で $G_{a2}$ を選択する。そして、選択・交叉データ記憶装置36に選択したビット列（個体）のデータを格納する。次に、ステップS142において、交叉手段5を用いて、 $G_{a1}$ 、 $G_{a2}$ を交叉させ、選択・交叉データ記憶装置36に新たな個体のデータを格納する。そして、ステップS143において、突然変異手段6を用いて、所定の方法で一部のビットパターンを適宜反転させて、図9に示すように、新たなビット列 $G_{a1}'$ 、 $G_{a2}'$ を生成する。ステップS144において、遺伝的操作制御手段12を用いて、ステップS141乃至S143までの処理を12分の $N$ 回繰り返したか否かを判断する。12分の $N$ 回繰り返していない場合は、ステップS141の処理へ戻る。12分の $N$ 回繰り返している場合は、次のステップS145の処理へ進む。ステップS141乃至S143までの操作を12分の $N$ 回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分の $N$ 個生成することができる。こうして生成される新たなビット列は、以後集合データ記憶装置35に格納される。

【0081】（ハ）次に、ステップS145において、選択手段4を用いて、 $F_2$ の値に反比例した選択確率で、ビット列 $G_{b1}$ を選択する。また、 $F_3$ の値に反比例した選択確率で $G_{b2}$ を選択し、選択・交叉データ記憶装置36にデータを格納する。そして、ステップS146において、交叉手段5を用いて、 $G_{b1}$ 、 $G_{b2}$ を交叉させ、選択・交叉データ記憶装置36にデータを格納する。ステップS147において、突然変異手段6を用いて、所定の方法で一部のビットパターンを反転させて、図9に示すように、新たなビット列 $G_{b1}'$ 、 $G_{b2}'$ を生成する。ステップS148において、ステップS145乃至S147までの処理を12分の $N$ 回繰り返したか否かを判断する。12分の $N$ 回繰り返していない場合は、ステップS145の処理へ戻る。12分の $N$ 回繰り返している場合は、次のステップS149の処理へ進む。ステップS145乃至S147までの操作を12分の $N$ 回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分の $N$ 個生成することができる。

【0082】（ニ）次に、ステップS149において、選択手段4を用いて、 $F_3$ の値に反比例した選択確率で、ビット列 $G_{c1}$ を選択する。また、 $F_1$ の値に反比例した選択確率で $G_{c2}$ を選択する。そして、ステップS150において、交叉手段5を用いて、 $G_{c1}$ 、 $G_{c2}$ を交叉させ、選択・交叉データ記憶装置36にデータを格納する。ステップS151において、所定の方法で一部のビットパターンを反転させて、図9に示すように、新たなビット列 $G_{c1}'$ 、 $G_{c2}'$ を生成する。ステップS1

52において、遺伝的操作制御手段12を用いて、ステップS149乃至S151までの処理を12分のN回繰り返したか否かを判断する。12分のN回繰り返していない場合は、ステップS149の処理へ戻る。12分のN回繰り返している場合は、次のステップS153の処理へ進む。ステップS149乃至S151までの操作を12分のN回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分のN個生成することができる。

【0083】(ホ) 次に、ステップS153において、選択手段4を用いてF<sub>1</sub>の値のみを基準にビット列G<sub>d1</sub>、G<sub>d2</sub>を選択する。そして、ステップS154において、G<sub>d1</sub>、G<sub>d2</sub>を交叉させる。ステップS155において、所定の方法で一部のビットパターンを反転させて、図9に示すように、新たなビット列G<sub>d1</sub>'、G<sub>d2</sub>'を生成する。ステップS156において、ステップS153乃至S155までの処理を12分のN回繰り返したか否かを判断する。12分のN回繰り返していない場合は、ステップS153の処理へ戻る。12分のN回繰り返している場合は、次のステップS157の処理へ進む。ステップS153乃至S155までの操作を12分のN回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分のN個生成することができる。

【0084】(ヘ) 次に、ステップS157において、F<sub>2</sub>の値のみを基準にビット列G<sub>e1</sub>、G<sub>e2</sub>を選択手段4を用いて選択し、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。そして、ステップS158において、G<sub>e1</sub>、G<sub>e2</sub>を交叉手段5を用いて交叉させ、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。ステップS159において、突然変異手段6を用いて、所定の方法で一部のビットパターンを反転させて、図9に示すように、新たなビット列G<sub>e1</sub>'、G<sub>e2</sub>'を生成する。ステップS160において、遺伝的操作制御手段12を用いて、ステップS157乃至S159までの処理を12分のN回繰り返したか否かを判断する。12分のN回繰り返していない場合は、ステップS157の処理へ戻る。12分のN回繰り返している場合は、次のステップS161の処理へ進む。ステップS157乃至S159までの操作を12分のN回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分のN個生成することができる。

【0085】(ト) 次に、選択手段4を用いて、ステップS161において、F<sub>3</sub>の値のみを基準にビット列G<sub>f1</sub>、G<sub>f2</sub>を選択し、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。そして、ステップS162において、交叉手段5を用いて、G<sub>f1</sub>、G<sub>f2</sub>を交叉させ、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。ステップS163において、遺伝的操作制御手段12を用いて、所定の方法で一部のビットパターンを反転させて、図9に示すように、新たなビット列G<sub>f1</sub>'、G<sub>f2</sub>'を生成する。ステップS164において、ステップS161乃至S163までの処理を12分のN回繰り返したか否かを判断する。

12分のN回繰り返していない場合は、ステップS161の処理へ戻る。12分のN回繰り返している場合は、本発明の第2の実施の形態に係わる選択・交叉制御処理を終了する。尚、ステップS161乃至S163までの操作を12分のN回繰り返すと、新たなビット列を合計で6分のN個生成することができる。

【0086】(チ) このようにして新たなビット列N個からなる集合Bを作成した後、図2のステップS110において、母体となったN個のビット列の集合Aを、新たなビット列の集合Bで置き換える。そして、集合A及びBは集合データ記憶装置35に格納される。

【0087】(リ) 図2のステップS111において、遺伝的操作制御手段12を用いて、図8のステップS141からS164までの処理を所定回数繰り返したか否かが判断される。所定回数繰り返されていない場合は、図8のステップS141の処理へ戻る。所定回数繰り返されている場合は、図2のステップS112の処理へ進む。

【0088】(ヌ) ステップS112において、最終結果を出力し、最適値記憶装置39に最適値を格納し、パラメータセットの探索を終了する。

【0089】図10(a)は、第2の実施の形態に係わる最適値探索方法を行った際の、2つのパラメータを変数に持つ、複数の(3つの)性能指標を表す関数をパラメータの値に対して示した図である。図10(b)は、第2の実施の形態に係わる最適値探索方法で、図10

(a)に示す複数の関数を同時に最大化する課題を処理した結果を表したものである。図10(b)に示す黒い点は個々のパラメータセットの座標を表す。そして、図10(b)では分かりにくい、個々の関数のピークを与える3カ所(x,y)=(1, 0), (-1, 0),

(0, 0.5)には、複数のパラメータセットが重畳して存在する。また、前記3点で囲まれた領域には、個々の性能指標は最大ではないが、どれもが大きな値をもつようなパラメータセットが存在する。

【0090】本発明の第2の実施の形態によれば、複数の性能指標を同時に最適化し、上述した「どれもが大きな値をもつような」値(複数の条件に対して一様に良い値)を最適解として探索することができる。また、本発明の第2の実施の形態では、空個体群生成手段9を用いて生成された空の個体群を用いることにより、選択した個体の交叉を可能にしている。

【0091】(第3の実施の形態) 図11に示す本発明の実施の形態に係わる最適値探索装置1は、中央演算処理装置(CPU)30とCPU30に入出力制御装置34を介して接続された入力装置31及び出力装置32と、CPU30に接続された集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39及び一時記憶装置(主記憶装置)33とから少なくとも構成さ



れている。CPU30には、図示を省略したデータベース管理手段が備えられている。そして、集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39との入出力が必要な場合は、このデータベース管理手段を介して、必要なファイルの格納場所を探し、ファイルの読み出し・書き込み処理がなされる。

【0092】CPU30には、初期集団生成手段2、適応度算出手段3、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6、初期設定手段7、一様乱数発生手段8、空個体群生成手段9、交叉位置決定手段10、交叉区間交叉手段11、遺伝的操作制御手段12が少なくとも含まれている。初期集団生成手段2は、問題の解をコード化し、各個体の特徴づける染色体として表現する。そして、決められた個体数(N個)の染色体を乱数を用いてランダムに生成し、初期集団を生成する。適応度算出手段3は、初期集団の各個体が、問題の解としてどれくらい適しているかを評価する手段であり、予め決定しておいた方法で評価値を求めるための手段である。選択手段4は、適応度算出手段で求められた評価値(性能指標)に基づき、評価の優劣に応じて個体が一定数残るように取捨選択するための手段である。交叉手段5は、選択手段4で選択された複数の個体の遺伝子を組み換えて、新しい個体を発生させるための手段である。複数の親から、別々の良い形質を受け継ぎより良い遺伝子を作り出すことが交叉の目的である。突然変異手段6は、遺伝子のある部分の値を強制的に換えて、個体集団としての多様性を大きくするための手段であり、遺伝子が局所的な最適解に落ち着いてしまうことを防ぎ、より広い範囲で最適解を探すための手段である。初期設定手段7は、重み付け公比、突然変異を起こす確率(突然変異率、又は書換確率)等を設定するための手段である。一様乱数発生手段8は、0以上1以下の一様乱数Rを発生するための手段である。空個体群生成手段9は、初期集団生成手段2で生成した初期集団の個体群と同じ大きさの個体群を生成する手段である。交叉位置決定手段10は、対象となるビット位置、即ち交叉する位置を決定するための手段であり、決定した位置は、選択・交叉データ記憶装置36に格納される。交叉区間交叉手段11は、交叉位置決定手段10で決定された交叉位置と交叉位置との間の各交叉区間を、交叉させるための手段である。遺伝的操作制御手段12は、選択手段4、交叉手段5、突然変異手段6の繰り返し処理、及び交叉区間交叉手段11の処理を制御し、最適な値を見いだすための手段である。

【0093】入力装置31は、キーボード、マウス、OCR等の認識装置、イメージスキャナ等の図形入力装置、音声認識装置等の特殊入力装置などにより、出力装置32は、液晶ディスプレイ、CRTディスプレイ等の表示装置、インクジェットプリンタ、レーザープリンタなどの印刷装置等によりそれぞれ構成される。入出力制

御装置(入出力インタフェース)34は、これらの入力装置31、出力装置32、あるいは図示を省略したCD-ROM、MO、ZIPなどの記憶装置の読み取り装置等をCPU30につなぐインタフェースである。データの流れから見ると、入出力制御装置34は、入力装置31、出力装置32、外部記憶装置の読み取り装置と一時記憶装置(主記憶装置)33とのインタフェースとなる。一時記憶装置(主記憶装置)33には、ROM及びRAMが組み込まれている。ROMは、CPU30において実行されるプログラムを格納しているプログラム記憶装置等として機能する。RAMは、CPU30におけるプログラム実行処理中に利用されるデータ等を一時的に格納したり、作業領域として利用される一時的なデータメモリ等として機能する。集合データ記憶装置35は、初期集団生成手段2で生成した初期集団のデータ、適応度算出手段3で算出した初期集団の適応度のデータ、突然変異手段6で生成された新たな個体で構成される新たな集団のデータを格納するための記憶装置である。選択・交叉データ記憶装置36は、選択手段4で選択された個体のデータ、交叉手段5で生成された新たな個体のデータ、交叉位置決定手段10で決定された位置データ、及び交叉区間交叉手段11で交叉させ生成された新たな個体のデータを格納しておくための記憶装置である。設定データ記憶装置37は、初期設定手段7及び一様乱数発生手段8などで生成されたデータを格納しておくための記憶装置である。空個体群記憶装置38は、生成した空の個体を格納しておくための記憶装置である。最適値記憶装置39は、最終的に遺伝的操作制御手段12で、生成された最適値(解)を格納するための記憶装置である。

【0094】尚、集合データ記憶装置35、選択・交叉データ記憶装置36、設定データ記憶装置37、空個体群記憶装置38、最適値記憶装置39は、CPU30の内部に収納されていても良く、CPU30の外部記憶装置として接続されていても良い。また、データベースサーバ等を介して接続されていても良い。また、交叉手段5は、交叉位置決定手段10及び交叉区間交叉手段11により代替することが可能であり、図示した構造に限定されるものではない。

【0095】次に、図2、図12及び図13を用いて、複数の性能指標関数を同時に最適化するパラメータセットの第2の探索手順について以下に説明する。第2の実施の形態と同様に、3個の性能指標 $F_1$ 、 $F_2$ 、 $F_3$ が与えられ、個体数 $N=3$ の倍数として説明する。図12は、図2のステップS105乃至S109に該当する処理である。図13には、図12の手順を用いて選択された親を交叉させた場合の一例を示す。

【0096】(イ)まず、図2のステップS100で入力データを読み込み、ステップS101において、初期集団生成手段2を用いて、初期集団として、一様乱数を

用いてパラメータセットを持つビット列 $G_1, G_2, \dots, G_N$ を $N$ 個生成する。そして、ステップS102において、適応度算出手段3を用いて、各ビット列 $G_1, G_2, \dots, G_N$ について性能指標 $F_1, F_2, F_3$ を計算する。そして、ステップS103において、ビット列 $G_1, G_2, \dots, G_N$ 、性能指標 $F_1, F_2, F_3$ 、パラメータセット $P_1, P_2, \dots, P_M$ の3つを1つの構成要素とする、 $N$ 個の要素（個体）からなる集合Aを作成し、集合データ記憶装置35に格納する。そして、ステップS104において、空個体群生成手段9を用いて、集合Aと同様の要素から成る同じサイズの空の配列（個体） $B_1, B_2, \dots, B_N$ を用意する。

【0097】（ロ）次に、図12のステップS181において、空個体群生成手段9を用いて、空のビット列（個体） $G_1', G_2', G_3'$ を用意する。

【0098】（ハ）次に、ステップS182において、 $F_1$ に反比例した選択確率でビット列 $G_1$ を、 $F_2$ に比例した選択確率で $G_2$ を、 $F_3$ に比例した選択確率で $G_3$ を選択する。

【0099】（ニ）次に、ステップS183において、交叉位置決定手段10を用いて、所定の方法でビット列上の交叉位置を所定個数定める。たとえば、図13の交叉位置a、b、cに示すように、交叉する位置を所定個数決める。

【0100】（ホ）次に、ステップS184において、交叉区間交叉手段11を用いて、 $G_1', G_2', G_3'$ の左側から交叉位置までの間のビットの値として $G_1'$ には $G_1$ の、 $G_2'$ には $G_2$ の、 $G_3'$ には $G_3$ の内容をコピーする。たとえば、図13（a）において、 $G_1'$ の左側から交叉位置aまでの間のビットの値として、 $G_1$ の左側から交叉位置aまでの内容をコピーする。同様に、 $G_2'$ の左側から交叉位置aまでの間のビットの値として、 $G_2$ の左側から交叉位置aまでの内容をコピーする。 $G_3'$ の左側から交叉位置aまでの間のビットの値として、 $G_3$ の左側から交叉位置aまでの内容をコピーする。コピーされたデータは、選択・交叉データ記憶装置37に格納される。

【0101】（ヘ）次に、図12のステップS185において、数列(1,2,3)の順序をランダムに並び替えて数列( $n_1, n_2, n_3$ )を用意し、ステップS186において、次の交叉位置またはビット列の最後まで $G_1', G_2', G_3'$ の値として、 $G_{n1}, G_{n2}, G_{n3}$ の値をそれぞれコピーする。たとえば、数列(1,2,3)をランダムに並び替え数列(2,3,1)になった場合、数列( $n_1, n_2, n_3$ )は、数列(2,3,1)のことを意味する。従って、「 $G_{n1}, G_{n2}, G_{n3}$ 」とは、「 $G_2, G_3, G_1$ 」のことを意味する。そして、図13（b）に示すように、交叉位置交叉手段11を用いて、 $G_1', G_2', G_3'$ の交叉位置aから交叉位置bまでの値として、 $G_2, G_3, G_1$ の交叉位置aから交叉位置bまでの値をコピーする。

【0102】（ト）次に、ステップS187において、遺伝的操作制御手段12を用いて、ビット列の右端まで到達したか否かを判断する。ビット列の右端まで到達していない場合は、ステップS185の処理に戻る。到達している場合は、次のステップS188において、ステップS181からS187までの処理を3分の $N$ 回繰り返したか否かを判断する。3分の $N$ 回繰り返していない場合は、ステップS181からS187までの処理を繰り返す。3分の $N$ 回繰り返している場合は、本発明の第3の実施の形態に係わる選択・交叉制御処理を終了する。

【0103】（チ）ステップS181からS188までの処理において新たなビット列 $N$ 個からなる集合Aを作成した後、図2のステップS110において、母体となった $N$ 個のビット列の集合Aを、新たなビット列の集合Bで置き換える。そして、図2のステップS111において、図12のステップS181からS188までの処理を所定回数繰り返したか否かが判断される。所定回数繰り返されていない場合は、図12のステップS181の処理へ戻る。所定回数繰り返されている場合は、図2のステップS112の処理へ進む。そして、ステップS112において、最終結果を出力しパラメータセットの探索を終了する。

【0104】本発明の第3の実施の形態に係わる最適値探索方法では、相反する複数の性能指標に対して、一様に良い値となるパラメータセットを探索することができる。また、本発明の第3の実施の形態では、空個体群生成手段9を用いて生成された空の個体群を用いることにより、交叉位置において交叉区間交叉手段11により選択した個体を交叉させることを可能にしている。

【0105】（第4の実施の形態）上述した、本発明の第1、第2、及び第3の実施の形態で説明した突然変異手順及び選択・交叉制御処理手順を測定データに対するモデル関数のフィッティングに適用し、測定データとの誤差の二乗和が最も小さくなるようにモデル関数の形状を既定するフィッティング・パラメータを定める手順について図14乃至図17を用いて以下に示す。具体的には、半導体製造工程の1つであるイオン注入工程直後の注入不純物イオンの深さ方向分布の測定データを、Pearson4関数と呼ばれる関数の4個のフィッティング・パラメータ、またはdual-Pearson4と呼ばれる関数の9個のフィッティング・パラメータを調整して測定データとの誤差の二乗和が最も小さくなるようにする操作（パラメータ抽出）に適用した場合の方法である。以下において、測定データとモデル関数（フィッティング曲線）との差の二乗和を「残差」と言う。

【0106】図17（a）は、Si結晶にホウ素（B）をイオン注入した場合に得られる深さ方向のホウ素の濃度分布をリニア軸で表示した場合を示した図で、図17（b）は、Si結晶にホウ素をイオン注入した場合に得

られる深さ方向のホウ素分布を対数軸で表示した場合を示した図である。図17(a)及び(b)のイオン注入の条件は、加速エネルギー1.5 MeV、ドーズ量 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 、チルト角0度、ローテーション角0度である。この条件でSi(100)基板にホウ素をイオン注入し、イオン注入直後(熱処理を行う前)に二次イオン質量分析(SIMS)を用いて計測した結果を図17(a)及び(b)の白抜き丸印(○)で示している。

【0107】図14及び図15には、図17(a)、

(b)に示すような、縦軸をリニア軸で表示した際の測定データとフィッティング曲線との残差と、縦軸を対数軸で表示した場合の測定データとフィッティング曲線との残差が共に最小になるようなモデル関数(フィッティング曲線)のフィッティング・パラメータを求める手順を示す。

【0108】(イ)まず、ステップS201において、モデル関数(フィッティング曲線)、フィッティング・パラメータ数M、フィッティング・パラメータ探索時の制約条件、探索時の遺伝子個体数N、世代数上限itr\_max、交配時の交叉点の数n\_c、無視すべきデータ範囲などを入力データとして読み込む。ここで、モデル関数のM個のフィッティング・パラメータ $P_1, P_2, \dots, P_M$ は、図16に示すように、それぞれ「1」及び「0」からなる数値列で表す。各パラメータは4個の「1」と「0」で表されているが、必要に応じて個数は増減しても良く、全てのパラメータが同じ「1」「0」の個数で表現される必要性はない。

【0109】(ロ)次に、ステップS202において、指定されたデータファイルを参照し、測定データとして、深さ方向の座標 $x(i)$ 、イオン濃度(不純物濃度) $y(i)$ を読み込む。更に、必要に応じてデータの重み $w(i)$ 又は測定誤差の逆数 $1/\sigma(i)$ を読み込む。

【0110】(ハ)次に、ステップS203において、指定されたモデル関数のフィッティング・パラメータ探索範囲の上限( $p_{\max}(j)$ )、下限( $p_{\min}(j)$ )と規格化因子 $1/(p_{\max}(i)-p_{\min}(i))$ 、及び初期推定値 $P_0(j)$ を設定する。尚、初期推定値は可能な場合にのみ設定する。

【0111】(ニ)次に、ステップS204において、初期集団生成手段2を用いて、遺伝子個体数がN個、フィッティング・パラメータがM個でその分離能Mbビットの場合、乱数を用いて1又は0からなる $M \times Mb$ 個のビット列からなる遺伝子個体 $gene(i)$ をN個生成し、集合データ記憶装置35に格納する。

【0112】(ホ)ステップS205において、適応度算出手段3を用いて、遺伝子個体毎にビット列からM個のフィッティング・パラメータ $P_1, P_2, \dots, P_M$ の値を計算する。そして、ステップS206において対数軸表示の場合の測定値との残差 $rxr\_log(i)$ とリニア軸表示の場合の測定値との残差 $rxr\_lin(i)$ を計算し、こ

れらのデータを集合データ記憶装置35に格納する。このとき、制約条件が指定されている場合には、ステップS207において、それを満たすか否かを判断する。制約条件を満たしている場合には、次のステップS208へ進み、制約条件を満たしていない場合は、ステップS204の処理に戻り、条件を満たすまで、乱数を用いてビット列を作る操作を繰り返す。そして、ステップS208において、必要回数反復したか否かの判定用に、世代数のカウンタ $l_g$ を0に初期化する。

【0113】(ヘ)次に、ステップS209において、残差 $rxr\_log(i)$ が最小の個体番号 $indx\_log$ と残差 $rxr\_lin(i)$ が最小の個体番号 $indx\_lin$ を集合データ記憶装置35に記録する。そして、ステップS210において、遺伝子選択に用いる表 $table\_log(i)$ と $table\_lin(i)$ を生成する。このとき、残差 $rxr\_log(i)$ の値、又は残差 $rxr\_lin(i)$ の値が小さいほど、 $table\_log(i)-table\_log(i-1)$ と $table\_lin(i)-table\_lin(i-1)$ の値がそれぞれ大きくなるように表を作る。ステップS211において、次の世代の遺伝子を全て作り終えたかの判定をするために必要な、生成した子のカウンタ( $l_p$ )を0に初期化しておく。

【0114】(ト)次に、ステップS212において、0から遺伝子選択表 $table\_log(M)$ の間の一様乱数 $r\_log$ と、0から遺伝子選択表 $table\_lin(M)$ の間の一様乱数 $r\_lin$ を用いて $table\_log(i) < r\_log < table\_log(i+1)$ となる添字 $i$ 及び $table\_lin(j) < r\_lin < table\_lin(j+1)$ となる添字 $j$ を求める。

【0115】(チ)次に、ステップS213において、交叉手段5を用いて、遺伝子 $gene(i)$ 及び $gene(j)$ のビット列を、 $n_c$ 回交叉させて子世代の遺伝子 $child\_gene(l_p)$ 、 $child\_gene(l_p+1)$ を生成し、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。ステップS214において、図4に示した方法で、ビット列の情報を反転させる。そして、ステップS215において、各ビット列のパラメータ値を求め、ステップS216において残差 $rxr\_log(l_p)$ 、 $rxr\_lin(l_p)$ 、 $rxr\_log(l_p+1)$ 、及び $rxr\_lin(l_p+1)$ を計算し、ステップS217において生成した子のカウンタ( $l_p$ )の値を「2」増加する。

【0116】(リ)ステップS218において、生成した子の数( $l_p$ )が、予め定めた探索時の遺伝子の個体数(N)を「3」で割った値未満である場合は、ステップS209の処理に戻り、更に子を生成する。生成した子の数( $l_p$ )が、予め定めた探索時の遺伝子の個体数(N)を「3」で割った数よりも大きい場合は、次のステップS219の処理へ進む。

【0117】(ヌ)ステップS219からS224では、対数軸表示の場合の残差 $rxr\_log$ の値にのみに注目し、これが小さくなるような次世代の遺伝子を以下のようにして合成する。まず、ステップS219において、「0」から遺伝子選択表 $table\_log(M)$ の間の新たな一様

乱数 $r\_log$ を用い、 $table\_log(i) < r\_log < table\_log(i+1)$ となる新たに添字 $j$ を求める。

【0118】(ル) 次に、ステップS220において、交叉手段5を用いて、遺伝子 $gene(i)$ と $gene(j)$ のビット列を、 $n\_c$ 回交叉させて子世代の遺伝子 $child\_gene(l\_p)$ 、 $child\_gene(l\_p+1)$ を作り、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。そして、ステップS221において、突然変異手段6を用いて、第1の実施の形態に示した方法で、ビット列の情報を反転させ、ステップS222において、それぞれのパラメータ値を求めて、ステップS223において、残差 $rxr\_log(l\_p)$ 、 $rxr\_lin(l\_p)$ 、 $rxr\_lin(l\_p+1)$ を計算する。その後、ステップS224において、生成した子のカウンタ( $l\_p$ )を「2」増加する。

【0119】(ヲ) ステップS225において、生成した子の数( $l\_p$ )が、予め定めた探索時の遺伝子の個体数( $N$ )を2倍して3で割った値未満である場合は、ステップS219からステップS224までの処理を繰り返す。生成した子の数( $l\_p$ )が、予め定めた探索時の遺伝子の個体数( $N$ )を2倍して3で割った値以上ならば、次のステップS226の処理へ進む。

【0120】(ワ) ステップS226からS231では、リニア軸表示の場合の残差 $rxr\_lin$ の値のみに注目しこれが小さくなるような次世代の遺伝子を以下のようにして合成する。まず、ステップS226において、「0」から $table\_lin(M)$ の間の一様乱数 $r\_lin$ を用い、 $table\_lin(i) < r\_lin < table\_lin(i+1)$ となる添字 $j$ を求める。

【0121】(カ) 次に、ステップS227において、遺伝子 $gene(i)$ と $gene(j)$ のビット列を、 $n\_c$ 回交叉させて子世代の遺伝子 $child\_gene(l\_p)$ 及び $child\_gene(l\_p+1)$ を生成し、選択・交叉データ記憶装置36に格納する。そして、ステップS228において、第1の実施の形態に示した方法で、ビット列の情報を反転させ、ステップS229において、それぞれのビット列のパラメータ値を求める。その後、ステップS230において、残差 $rxr\_log(l\_p)$ 、 $rxr\_lin(l\_p)$ 、 $rxr\_log(l\_p+1)$ 、 $rxr\_lin(l\_p+1)$ を計算し、ステップS231において、生成した子のカウンタ( $l\_p$ )を「2」増加する。

【0122】(ヨ) ステップS232において、遺伝的操作制御手段12を用いて、生成した子の数( $l\_p$ )が、予め定めた探索時の遺伝子の個体数( $N$ )未満であればステップS226からS231の処理を繰り返す。生成した子の数( $l\_p$ )が、探索時の遺伝子の個体数( $N$ )より大きい場合は、次のステップS233の処理へ進む。

【0123】(タ) ステップS233において、 $N$ 個の遺伝子 $gene(i)$ を $child\_gene(i)$ で全てを置き換え、世代数のカウンタ $l\_g$ の値を「1」増加させる。そして、ステップS234において、世代数のカウンタ $l\_g$ の値が

世代数の上限値 $itr\_max$ 未満であればステップS209の処理に戻り、次の世代の遺伝子を作る手順を繰り返す。世代数カウンタ $l\_g$ の値が世代数の上限値 $itr\_max$ 以下でない場合は、次のステップS235の処理へ進む。

【0124】(レ) 次に、ステップS235において、残差 $rxr\_lin(i)$ 及び残差 $rxr\_log(i)$ をそれぞれ小さい順に並べ替える。そして、ステップS236において、抽出されたパラメータ値 $p(j)$ を指定ファイルに出力し、必要に応じて探索した範囲 $pmin(j)$ 、 $pmax(j)$ 、残差、データファイル名、計算時の個体数、世代数などを指定ファイルに出力し、最適値記憶装置39に格納する。

【0125】尚、第4の実施の形態では、次の世代の遺伝子を作るに当たり、まず、測定値とフィッティング曲線(モデル関数)との残差 $rxr\_log(i)$ 及び $rxr\_lin(i)$ の値に着目して親を選択することを行い、その次に残差 $rxr\_log(i)$ のみに注目して親を選択し、最後に $rxr\_lin(i)$ のみに注目して親を選択したが、この順序は本質的ではなく、任意の順に行っても同じ効果を得ることができる。また、探索時の遺伝子の個体数( $N$ )について、第4の実施の形態では特に指定はしなかったが、 $N$ は6の倍数であれば個体作成時の判断に剰余がでず、また、作成された子の世代にも切り捨ての無駄が生じないので好ましい。

【0126】第4の実施の形態に示したように、第1乃至第3の実施の形態で示したような突然変異手法及び選択・交叉処理制御手順を用いることにより、図17

(a)のようにリニアで表示する場合においても、図17(b)のように対数で表示する場合においても、良くフィットする実験曲線を得ることができる。

【0127】第4の実施の形態における手法を用いることにより、実験曲線のフィッティング時に残差(誤差)を最小にすることができる。また、第4の実施の形態における適用手順を用いれば、一旦、モデル関数(フィッティング曲線)が決まってしまうと、このモデル関数を用いて異なる条件の下、イオン注入を行った場合どのようなのかを簡単にシミュレートすることができる。このため、より正確なプロセスシミュレーションが可能となる。

【0128】(半導体の製造方法) 本発明の測定結果に対するパラメータ・フィッティング方法を用いれば、異なる条件においてイオン注入を行った場合どのような深さ方向のプロファイルになるのかを簡単にシミュレートすることができる。従って、第4の実施の形態によって得られたモデル関数(フィッティング曲線)を半導体集積回路のプロセスシミュレーションに用いれば、高精度な半導体集積回路の設計を容易に行うことができる。図18に半導体製造工程のフロー図を示す。

【0129】(イ) まず、ステップS299a、S299b、S299c・・・の基礎実験を行う。ステップS299a、S299b、S299c・・・の基

礎実験においては、プロジェクトの目標とする半導体集積回路の製造に必要な低温CVD、高温CVD、エピタキシャル成長、真空蒸着、スパッタリング、イオン注入、気相拡散（プレデポジション）、熱処理、・・・等の工程のうち、新たな条件出しが必要なプロセスが選択され、種々の成膜構造、金属半導体接合、絶縁膜半導体接合、ヘテロ接合、pn接合等が形成される。そして、これらのステップS299の基礎実験で作成された種々の基板内プロファイル、界面構造若しくは表面構造に対して、不純物プロファイル測定、結晶欠陥測定、放射線損傷測定、電気的特性測定、磁気的特性測定等がなされる。これらの測定は、IR吸収測定、ラマン散乱測定、走査型トンネル顕微鏡測定、2次イオン質量分析（SIMS）、オージェ電子分光（AES）、ラザフォード後方散乱（RBS）等を用いて実行する。そして、ステップS300においては、第1から第4の実施の形態で説明した最適値探索装置1を用いて、パラメータを探索し、最適なモデル関数（フィッティング曲線）を決定する。

【0130】（ロ）次に、ステップS300によって得られたモデル関数を用いて、ステップS301において、プロセスシミュレーションが実行される。ステップS301のプロセスシミュレーションによって半導体集積回路を構成するための半導体基板中の不純物や欠陥の分布、或いは、その表面の半導体集積回路の構造パラメータが決定される。更に、これらの不純物分布や形状に対応した各製造工程のプロセス条件が決定される。これらの不純物や欠陥の分布、或いは、構造パラメータは、デバイスシミュレータに入力される。

【0131】（ハ）ステップS302におけるデバイスシミュレーションを行う際には、プロセスシミュレーションで得られた素子構造と不純物分布等の結果と同時に、印加電圧、電流などの電気的な境界条件を与えるための入力データ等が加えられる。そして、ステップS302におけるデバイスシミュレーションにより、電流電圧特性等の半導体集積回路を構成するデバイスの電気的特性（デバイス特性）が得られる。更に、ステップS304において、回路シミュレータは、デバイスシミュレーションから得られた電気的特性を基に、回路シミュレーションを実行する。

【0132】（ニ）次に、ステップS305において、ステップS302のデバイスシミュレーション又はステップS304の回路シミュレーションにより、得られた電気的特性や回路特性が作ろうとしている所望の半導体集積回路の電気的特性や回路特性になるかどうかを評価・検討する。所望の電気的特性や回路特性であれば、実際の半導体集積回路の製造工程に取りかかる。

【0133】（ホ）すなわち、ステップS305の評価により、所望の半導体集積回路の電気的特性や回路特性であれば、ステップS306において、実際の半導体集

積回路の製造工程に取りかかる。ステップS306においては、まず、ステップS301のプロセスシミュレーションで得られた形状を基礎としてフォトリソグラフィ工程用のマスク（レティクル）を製造する。そして、このレティクルをステッパーにセットしてフォトリソグラフィ工程を行い選択的な熱拡散やイオン注入工程等を実施し、半導体基板に対し、不純物をドーピングする。熱拡散の温度、時間、イオン注入の加速エネルギー、ドーズ量は、ステップS301で決定されたプロセスシミュレーションの結果に従って決められる。更に、フォトリソグラフィ工程や、ドライエッチング工程等の形状加工工程で半導体基板やその表面の薄膜の加工等を行う。更に、エピタキシャル成長、CVD、真空蒸着、スパッタリング等の成膜工程等を含んでも良い。これらの各プロセスの条件は、ステップS301のプロセスシミュレーションの結果によって既定される。もし、ステップS305の評価により、所望の特性にならないときには、考えた製造工程では作りたい素子は作れないので、製造工程の条件を変更し、工程の順番など手順そのものを変更し再度、ステップS301、若しくはステップS302に戻る。ステップS301に戻った場合は、更にこのステップS301のプロセスシミュレーションの結果を入力データとして、ステップS302のデバイスシミュレーション、ステップS304の回路シミュレーションを行なう。更に、ステップS306においては、実際の半導体集積回路の製造工程の結果得られた現実の半導体集積回路の特性を測定する。

【0134】（ヘ）そして、ステップS307において、ステップS306において測定された半導体集積回路の特性が当初の要求仕様を満足するか否かを評価する。この評価により実際に製造された半導体集積回路の特性が要求仕様を満足しなければ、ステップS308において設計変更がなされ、ステップS301に戻り、再度プロセスシミュレーションを行なう。そして、このプロセスシミュレーションの結果を入力データとして、ステップS302のデバイスシミュレーション、ステップS304の回路シミュレーションを行なうという一連の手順からなるループが繰り返される。

【0135】LSI等の半導体集積回路の分野では、研究（設計）から開発までの期間の短さを競っている。このような半導体産業における競争の現実を考慮すれば、半導体集積回路の解析やシミュレーション期間はなるべく短期、且つ正確に行なわなければならない。図18に示す適用手順を用いれば、第4の実施の形態において見いだした最適モデル関数（フィッティング曲線）を用いたシミュレーションを行うため、新たな条件出しが必要な製造プロセスを正確にシミュレーションできる。このため、高精度な半導体集積回路の解析及び回路シミュレーションが必要な複雑な半導体集積回路の研究（設計）から開発までのループの周期が飛躍的に短縮され、

工業的利益およびその重要性は極めて高い。

【0136】上記のように、本発明は第1乃至第4の実施の形態によって記載したが、この開示の一部をなす論述及び図面は、この発明を限定するものであると理解すべきではない。この開示から当業者には様々な代替実施の形態、実施例及び運用技術が明らかとなろう。

【0137】本発明はここでは記載していない様々な実施の形態等を包含するということを理解すべきである。したがって、本発明はこの開示から妥当な特許請求の範囲に係る発明特定事項によってのみ限定されるものである。

#### 【0138】

【発明の効果】本発明によれば、書き換え前のビット列が表すパラメータ空間での位置に対し、書き換え後の位置が大きく移動する割合を低下させることができ、少ない反復回数で全パラメータを真の解に到達させ、効率的なパラメータ探索を実現することができる。

【0139】本発明によれば、相反する複数の性能指標に対して妥協的な値となるパラメータセットを探索し、最適解を得ることができる。

【0140】本発明によれば、実験結果に対するモデル関数のフィッティングを従来に比べ短い時間で、自動的に探索することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明における最適値探索装置の構成図である。

【図2】本発明に係わる遺伝的アルゴリズム全体を示したフローチャートである。

【図3】本発明の実施の形態に係わる探索空間における個体の適応度をプロットした適応度地形を示した図である。

【図4】本発明の第1の実施の形態に係わる遺伝子型（個体）の一例である。

【図5】本発明の第1の実施の形態に係わる重み付けの方法のフローチャートである。

【図6】図6（a）は、本発明の第1の実施の形態に係わる方法を用いた際のパラメータ値の推移を示す。図6（b）は、従来の方法で最適値を探索した際のパラメータ値の推移を示す。

【図7】本発明の第2の実施の形態に係わる最適値探索装置の構成図である。

【図8】本発明の第2の実施の形態に係わる最適値探索方法の交叉方法のフローチャートである。

【図9】本発明の第2の実施の形態における最適値探索方法の交叉方法の一例を示した図である。

【図10】図10（a）は、本発明の第2の実施の形態に係わる複数の性能指標を示した図である。図10

（b）は、本発明の第2の実施の形態に係わる最適値探索方法を用いて複数の性能指標を同時に最適化した場合の一例を示した図である。

【図11】本発明の第3の実施の形態に係わる最適値探索装置の構成図である。

【図12】本発明の第3の実施の形態に係わる最適値探索方法の交叉方法のフローチャートである。

【図13】本発明の第3の実施の形態に係わる最適値探索方法の交叉方法の一例を示した図である。

【図14】本発明の第4の実施の形態に係わるパラメータ・フィッティング方法のフローチャート（その1）である。

【図15】本発明の第4の実施の形態に係わるパラメータ・フィッティング方法のフローチャート（その2）である。

【図16】本発明の第4の実施の形態に係わる個体の一例を示した図である。

【図17】図17（a）は、本発明の第4の実施の形態に係わる方法を用いた場合の、不純物の濃度をリニア軸で表示した図である。図17（b）は、本発明の第4の実施の形態に係わる方法を用いた場合の、不純物の濃度を対数軸で表示した図である。

【図18】本発明の第4の実施の形態に係わるパラメータ・フィッティング方法を用いた半導体装置の製造方法のフローチャートである。

#### 【符号の説明】

- 1 最適値探索装置
- 2 初期集団生成手段
- 3 適応度算出手段
- 4 選択手段
- 5 交叉手段
- 6 突然変異手段
- 7 初期設定手段
- 8 一様乱数発生手段
- 9 空個体群生成手段
- 10 交叉位置決定手段
- 11 交叉区間交叉手段
- 12 遺伝的操作制御手段
- 31 入力装置
- 32 出力装置
- 33 一時記憶装置
- 34 入出力制御装置
- 35 集合データ記憶装置
- 36 選択・交叉データ記憶装置
- 37 設定データ記憶装置
- 38 空個体群記憶装置
- 39 最適値記憶装置
- 40 適応度地形
- 41 探索空間
- 42 最適値
- 43 理想的な探索範囲
- 44 局所解
- 45 遺伝子型

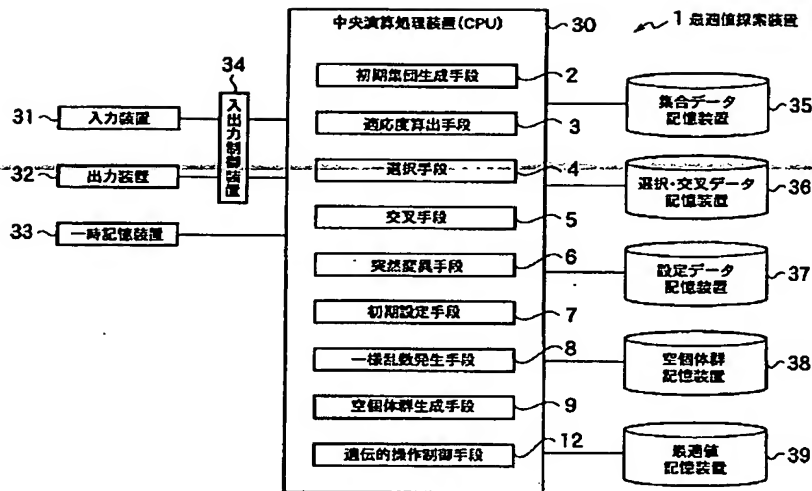


46 上位ビット

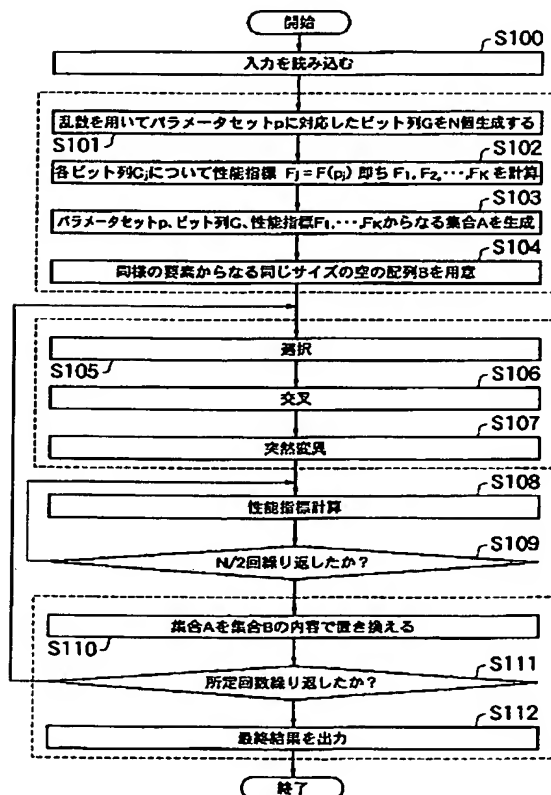
47 下位ビット

50 個体

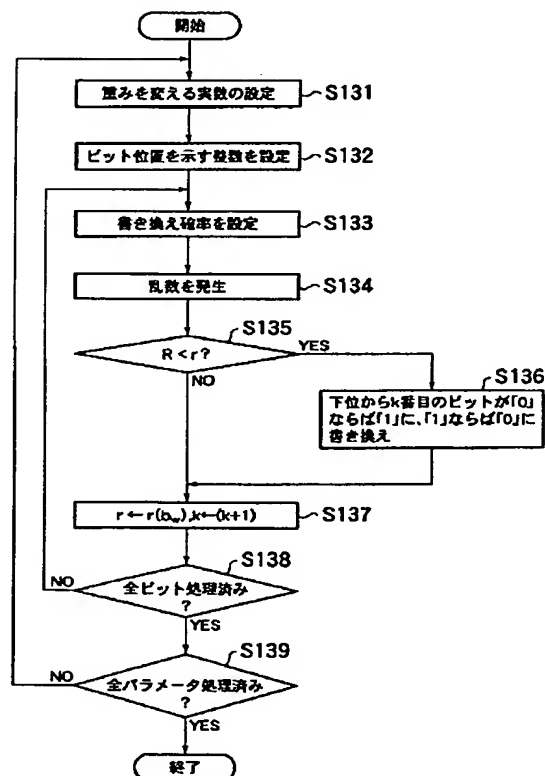
【図1】



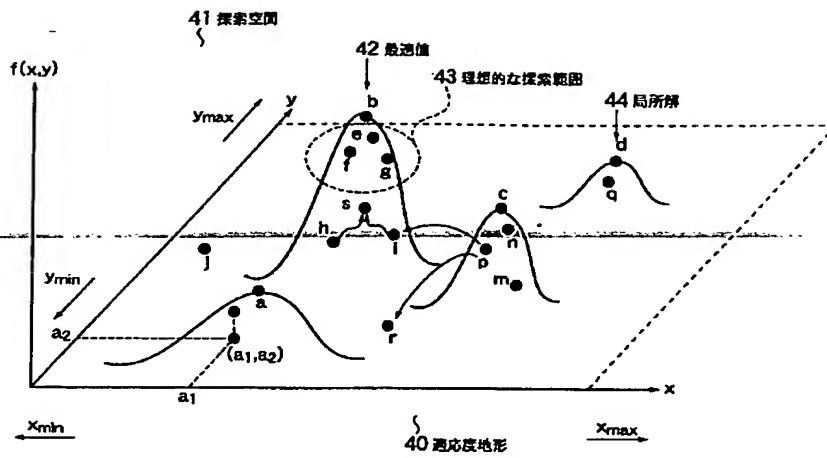
【図2】



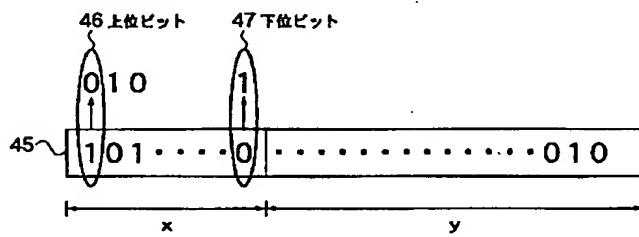
【図5】



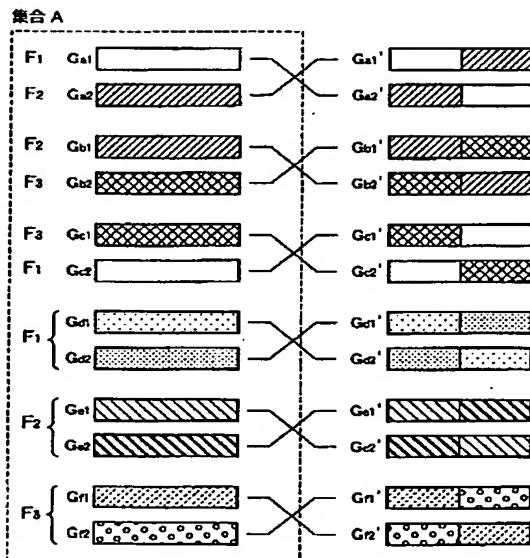
【図3】



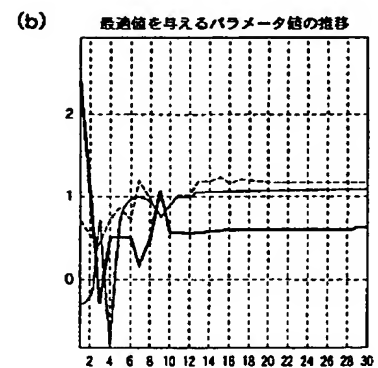
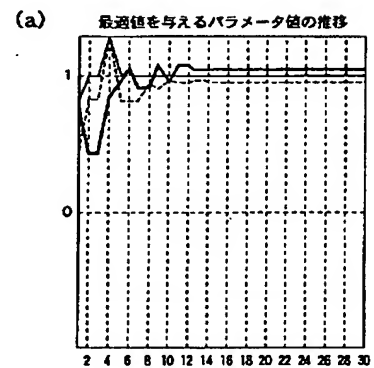
【図4】



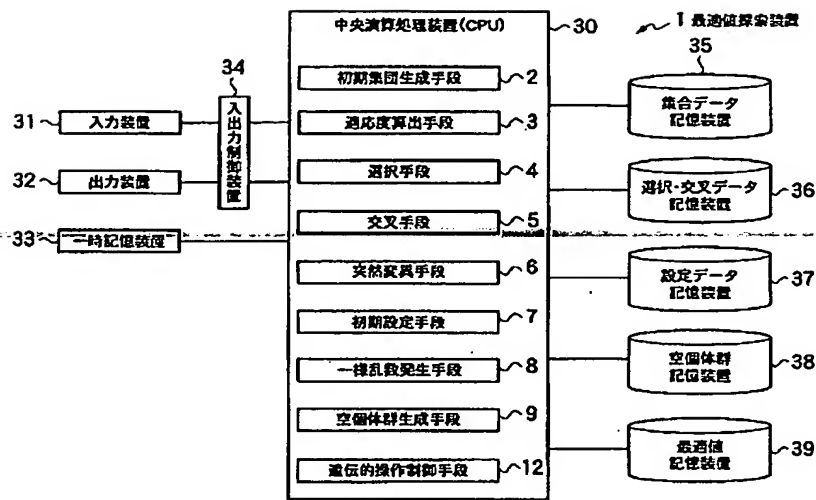
【図9】



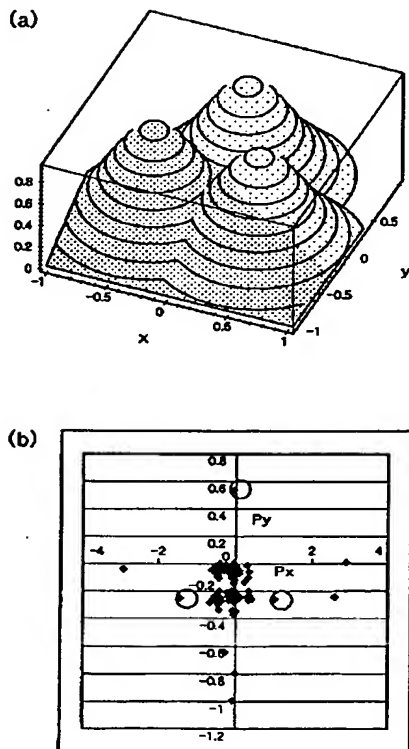
【図6】



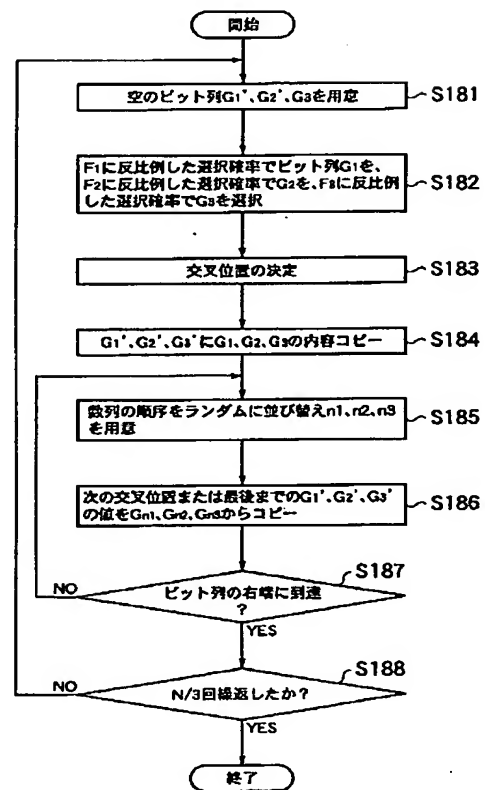
【図7】



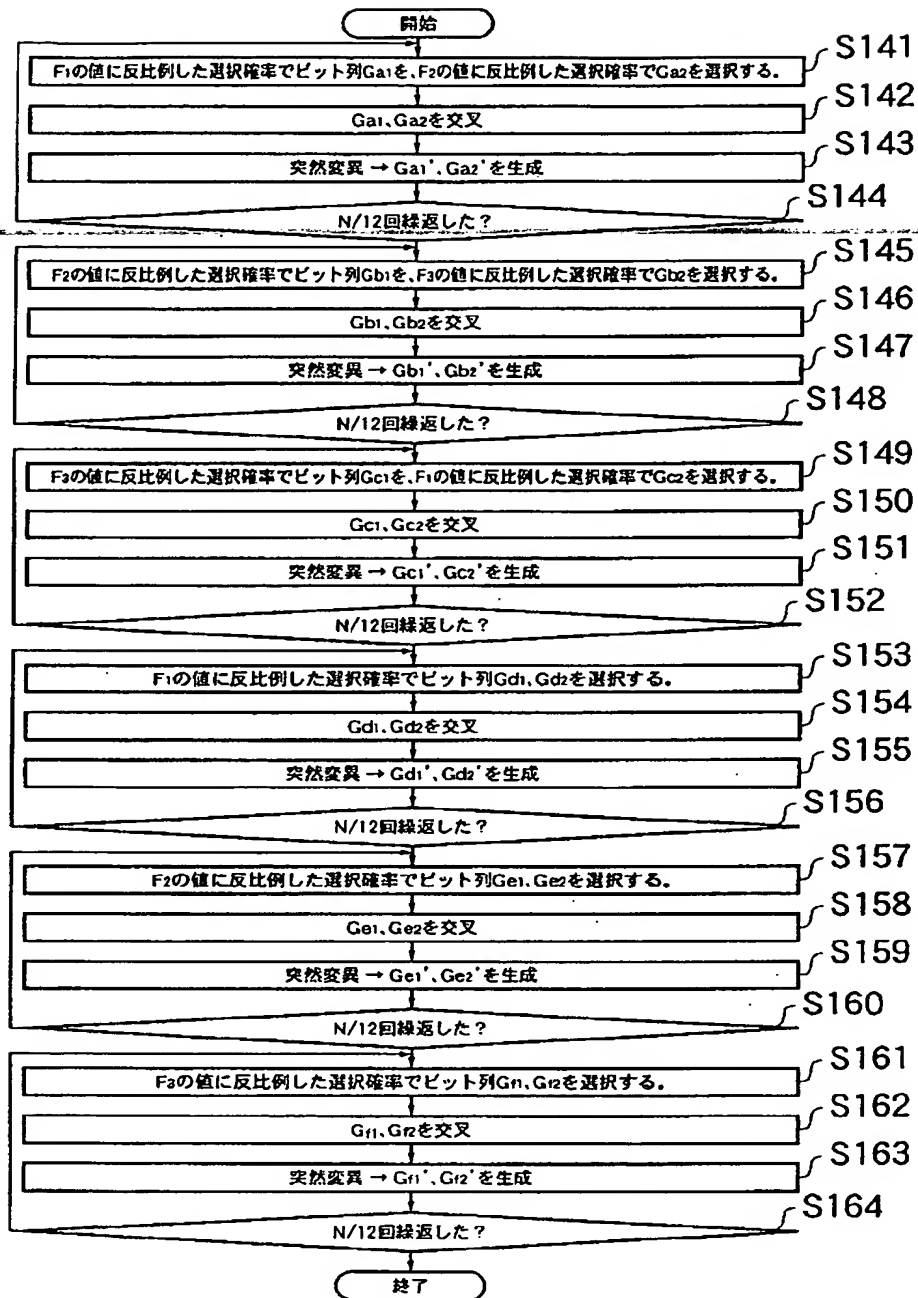
【図10】



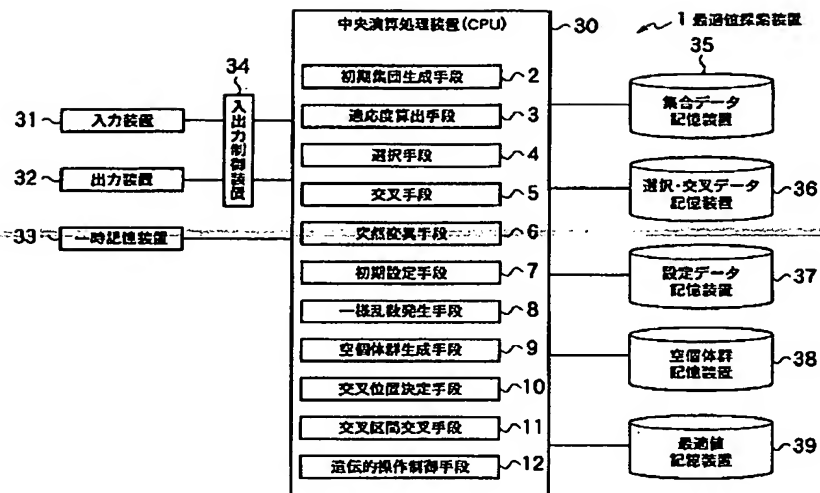
【図12】



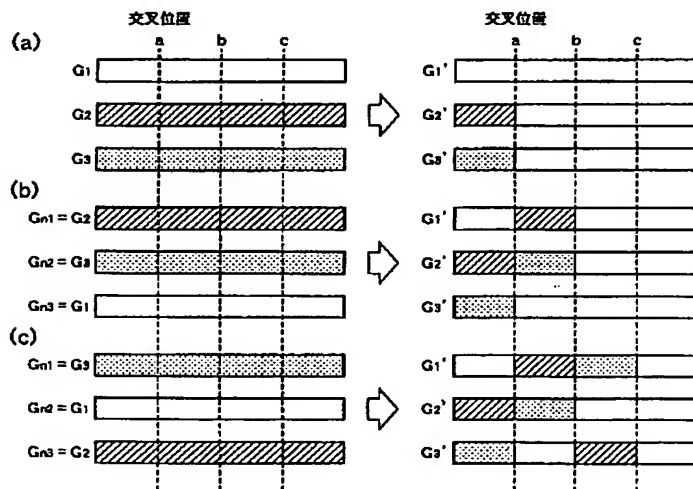
【図8】



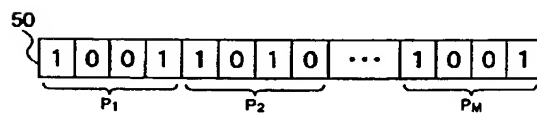
【図11】



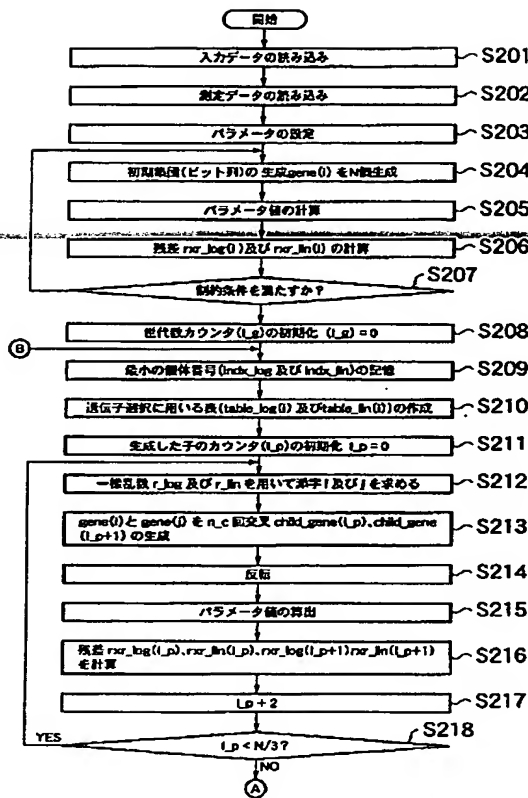
【図13】



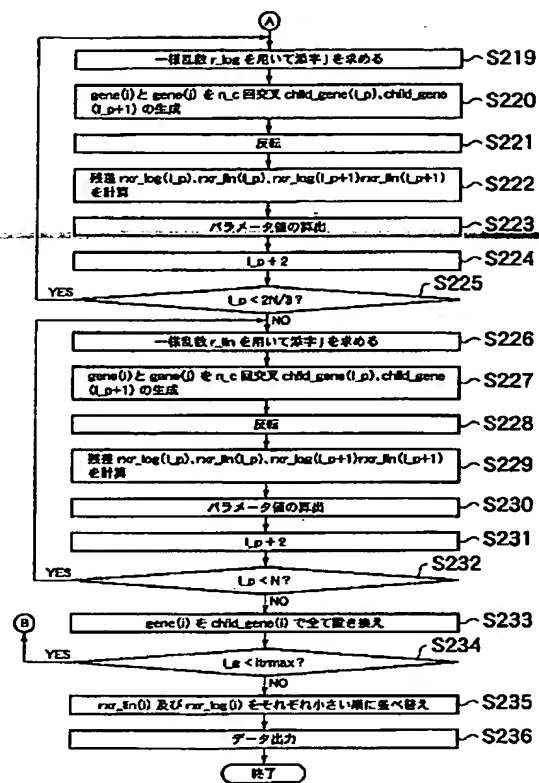
【図16】



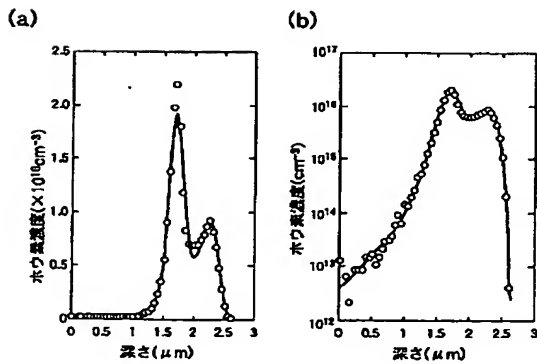
【図14】



【図15】



【図17】







**This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning  
Operations and is not part of the Official Record**

**BEST AVAILABLE IMAGES**

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

- ☐ **BLACK BORDERS**
- ☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- ☐ **FADED TEXT OR DRAWING**
- ☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**
- ☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- ☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**
- ☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**
- ☐ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**
- ☐ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**
- ☐ **OTHER:** \_\_\_\_\_

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.**